



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

VÝVOJ A VLASTNOSTI HISTORICKÉ ZDICÍ MALTY

DEVELOPMENT AND PROPERTIES OF HISTORIC MASONRY MORTAR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MARTIN LIŠOVSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. MARCELA FRIDRICHOVÁ, CSc.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Martin Lišovský
Název	Vývoj a vlastnosti historické zdící malty
Vedoucí práce	prof. Ing. Marcela Fridrichová, CSc.
Datum zadání	30. 11. 2016
Datum odevzdání	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Online databáze SCOPUS, ELSEVIER, WEB OF SCIENCE.

České technické normy.

ROVNANÍKOVÁ, P. Termická analýza jako nástroj pro návrh složení historických malt a omítek. 2010. ISBN: 978-80-7395-259- 4.

HOŠEK, J., LOSOS, L. Historické omítky, Granda Publishing, Praha, 2007, ISBN 978-80-247-1395-3.

SCHULZE, W., TISCHER, W., LACH, V., ETTEL, P., Necementové malty a betony, SNTL, Praha, 1990.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V souvislosti s požadavky na materiály použitelné pro opravu a rekonstrukci historických objektů je potřebné věnovat se i vývoji bezcementových malt na bázi historicky přípustných pojiv. Proto je cílem práce vyhledání možných pojiv, návrh složení a odzkoušení základních vlastností malt vhodných pro tento účel.

Práce bude provedena v souladu s následujícími pokyny:

- Rešerše stavu poznání.
- Vyhledání vhodného pojivového systému na bázi trasy, event. jiného pucolánu.
- Návrh receptury a příprava vzorků historické malty.
- Odzkoušení základních technologických vlastností.

Rozsah práce cca 40 stran formátu A4 včetně příloh.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).

2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

prof. Ing. Marcela Fridrichová, CSc.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá vývojem a vlastnostmi historické malty, zejména pak vápenným maltám a jejich modifikaci pomocí pucolánů. U receptur navržených v experimentální části je pro modifikaci použit metakaolin. Technologické a aplikační vlastnosti historizujících malt vyrobených z těchto receptur jsou pak srovnávány s komerční maltou SCHWENK TM 5, která je modifikována suevitským trasem.

KLÍČOVÁ SLOVA

Historická zdicí malta, malta, pucolán, vápno, metakaolin, tras, historizující malta.

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with development and properties of historic masonry mortar, especially lime mortars and their modifications using pozzolan. In the recipe developed in the experimental part, metakaolin is used for the modification. The technological and application properties of historicizing mortars made of these formulations are then compared with the commercial mortar SCHWENK TM 5, which is modified by the suevite trass.

KEYWORDS

Historic masonry mortar, mortar, pozzolan, lime, metakaolin, trass, historicizing mortar.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Martin Lišovský *Vývoj a vlastnosti historické zdící malty*. Brno, 2017. 60 s.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav
technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Marcela Fridrichová,
CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 26. 5. 2017

Martin Lišovský
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl poděkovat paní prof. Ing. Marcele Fridrichové, CSc., za odborné a pedagogické vedení, dále pak za trpělivost a cenné rady při vedení mé bakalářské práce. Rovněž bych chtěl poděkovat Ing. Dominiku Gazdičovi, Ph.D. za rady a pomoc s experimentální částí. Velké díky patří i ostatním zaměstnancům Ústavu technologie stavebních hmot a dílců, kteří mi byli při mé práci jakkoliv nápomocni.

Děkuji i své rodině a blízkým za podporu nejen při studiu.

OBSAH

ÚVOD	10
I. TEORETICKÁ ČÁST	12
1. Malty a jejich vlastnosti.....	12
1.1. Všeobecné rozdělení stavebních malt	12
1.2. Složky stavební malty	13
1.2.1. Pojivo.....	13
1.2.2. Plnivo.....	13
1.2.3. Přísady a příměsi.....	14
1.2.4. Záměšová voda	14
1.3. Druhy malt.....	14
1.3.1. Hlínové malty	15
1.3.2. Sádrové malty.....	15
1.3.3. Vápenné malty.....	15
1.3.4. Cementové malty.....	16
1.3.5. Vápno-hlínové malty	16
1.3.6. Vápno-sádrové malty.....	16
1.3.7. Vápno-cementové malty	16
2. Pojiva malt.....	17
2.1. Jílové zeminy	17
2.2. Síranová pojiva	18
2.3. Vápenná pojiva	21
2.3.1. Historie vápenných pojiv	22
2.3.2. Vápno	23
2.3.3. Vápenný hydrát	24
2.3.4. Karbidové vápno.....	25
2.3.5. Hydraulické vápno	25
2.3.6. Tuhnutí a tvrdnutí vápna	26
2.4. Cement	27
2.4.1. Historický vývoj cementu	27
2.4.2. Portlandský cement	27
3. Plniva malt.....	28
3.1. Dělení malt dle plniva.....	28
3.2. Plniva anorganická.....	28
3.3. Plniva organická.....	29
3.4. Barviva	30
4. Přísady a příměsi do malt.....	30

4.1.	Organické přísady	30
4.2.	Syntetické přísady	32
4.3.	Anorganické příměsi do malt.....	32
4.3.1.	Pucolány	33
4.3.2.	Pucolánová reakce	34
4.3.3.	Metakaolin	34
4.3.4.	Tras	35
4.3.5.	Suevitský tras	35
4.3.6.	Přínos trasu pro modifikaci malt pro historické budovy	37
5.	Některé historické postupy přípravy vápenných malt	37
5.1.	Příprava malty z vápenné kaše	37
5.2.	Příprava malty ze suchého hydrátu.....	38
5.3.	Příprava malty z nehašeného vápna.....	38
6.	Zkoušení stavebních malt	39
6.1.	Zkoušení čerstvých malt	39
6.2.	Zkoušení zatvrdlých malt	40
II.	Experimentální část	41
	Cíl práce	41
1.	Metodika práce	41
2.	Postup práce	42
3.	Použité suroviny a přístroje	43
3.1.	Použité suroviny	43
3.2.	Použité přístroje	44
4.	Vyhodnocení zkoušek	45
4.1.	Návrh receptur suchých maltových směsí.....	45
4.2.	Sypná hmotnost a granulometrický rozbor suché maltové směsi	45
4.3.	Množství záměsové vody	48
4.4.	Objemová hmotnost čerstvé malty	49
4.5.	Objemová hmotnost a pevnosti zatvrdlé malty.....	50
4.6.	Aplikační vlastnosti	53
5.	Diskuze výsledků	53
	Závěr	55
	Seznam použitých zdrojů	56
	Seznam tabulek	59
	Seznam grafů	59
	Seznam obrázků	60

ÚVOD

Pojem historický stavební materiál, zde konkrétně malta, začíná být v dnešní době čím dál častěji skloňován nejen z pohledu minulosti, ale stává se určitým způsobem perspektivním materiálem pro výrobce stavebních hmot. Jejich výzkumu a testování se začíná věnovat čím dál větší pozornost.

Důvodem zájmu o historické stavební materiály je čím dál větší potřeba oprav a sanací právě historických objektů, kterých je na světě nespočet a které postupem času začínají ještě více trpět. Mění se prostředí i způsob využití těchto objektů a to má za následky rychlejší poškození historických materiálů, které nemusí být dnešním podmínkám odolné tolik, jako materiály novodobé.

Firmy se postupně snaží jít s tímto trendem, ovšem zastoupení v této oblasti není velké, v porovnání s běžnými stavebními materiály. Konkrétně naše oblast střední Evropy a směrem na východ si původní materiály žádá. Většina zemí této oblasti byla v historii součástí tzv. východního bloku a je realitou, že minulý režim nebyl k opravám a sanacím historických budov zrovna přívětivý. Naprosto se ignorovaly tradice a kvalitní práce byla odbyta rychlou aplikací tehdy moderních materiálů, které však často absolutně nekorespondovaly s tím, co si stavba opravdu žádala.

Naštěstí v dnešní době je již více institucí, které o užitém materiálu rozhodnou. Na jedné straně je přání investora, jehož počínání, při rekonstrukcích, do jisté míry může ovlivnit tlak památkového úřadu, který se snaží vymýtit nešvary minulé doby a tak je zde místo právě pro firmy, které se vývojem materiálů, které budou určitým způsobem autentické, zabývají.

Historie je velice široký časový interval, což dává mnoho prostoru v tom, na jakých bázích může výrobce své materiály stavět a pro které konkrétní období a typy objektů budou použity. Půjdeme-li chronologicky, dostaneme se, u malt a omítek od hlíny přes sádku a vápno, až k poměrně „modernímu“ cementu.

Nejvýznamnější místo má v historii vápenná technologie, která byla využívána prakticky nejvíce a různě se měnila v ohledu na zlepšování kvality vápenné malty.

Tato práce se zabývá historickým vývojem zdicí malty na různých pojivových bázích, zejména se zaměřuje na vápenné malty, vzhledem k jejich nejvýraznějšímu zastoupení ve stavbách historických objektů. Dále se pak věnuje modifikaci vápenných malt pomocí trasu a metakaolinu, jelikož modifikace vápenných malt pomocí příměsí s pucolánovými vlastnostmi byly v historii velmi významné.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1. Malty a jejich vlastnosti

1.1. Všeobecné rozdělení stavebních malt

Malty jsou zatvrdlé směsi pojiv (maltovin) s plnivou (písky, drtění apod.), přísadami a s vodou, které mají v čerstvém stavu nejčastěji formu plastické kaše, výjimečně tekuté konzistence a nazývají se čerstvé malty. Používají se především ke spojování stavebních prvků (cihla, kámen) a k úpravě povrchu stavebního díla. Obsah a typ pojiva (pojiv) a plniv se řídí tím, jaké vlastnosti má syrová i zatvrdlá malta mít. [1] [7]

Dělení stavebních malt:

1) Dle účelu použití:

- malty pro zdění
- malty pro omítání
- malty pro výrobu keramických dílců
- malty tepelně izolační
- malty stykové a spárovací
- malty pro kladení dlažeb a obkladů
- malty pro speciální účely
- sanační malty a omítky

2) Dle pojivové báze:

- vápenné
- vápenocementové
- vápenosádrové
- sádrové
- cementové
- polymercementové
- hliněné malty

3) Dle objemové hmotnosti malty ve vysušeném stavu

- malty tepelně izolační do 1100 kg.m^{-3}
- malty vylehčené do 1600 kg.m^{-3}
- malty obyčejné do 2300 kg.m^{-3}

- malty těžké nad 2300 kg.m⁻³

4) Dle pevnosti v tlaku:

Třída	M1	M2,5	M5	M10	M15	M20	Md
Pevnost v tlaku v [N/mm ²]	1	2,5	5	10	15	20	> 25

5) Dle tepelné vodivosti se dělí tepelně izolační malty na:

- tepelně izolační $\lambda \leq 0,4 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- vysoce tepelně izolační $\lambda \leq 0,25 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- mimořádně tepelně izolační $\lambda \leq 0,14 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

6) Dle dalších vlastností můžeme malty dělit na:

- mrazuvzdorné, vodotěsné nebo propustné vodním parám, dále pak na malty se zvláštními vlastnostmi nebo pro zvláštní účely (umělý kámen, krytalové malty, barytové malty, žárovzdorné malty aj.) [20]

1.2. Složky stavební malty

Pro výrobu malt jsou používány zejména tyto hmoty:

1.2.1. Pojivo

- vyhašené vzdušné vápno ve formě vápenné kaše, vápenný hydrát objemově stálý nebo obyčejný, vápno hydraulické
- hydraulické směsné pojivo – průmyslově vyrobené, jemně práškové hydraulické pojivo skládající se z portlandského cementu, slínku, anorganických látek a kde je to vhodné, ze speciálních organických příměsí
- cement portlandský CEM I, cement portlandský struskový CEM II/A, B-S, speciální cementy (např. bílý)
- sádrové pojivo rychle tuhnoucí, normálně tuhnoucí a pomalu tuhnoucí

1.2.2. Plnivo

- přírodní kamenivo
- granulovaná vysokopecní struska, škvára, popílek
- teracové drtě
- kamenivo vyrobené z přírodních surovin (keramzit, perlit aj.)
- slévárenský písek
- granulovaný expandovaný polystyren

Přírodní těžené kamenivo, jehož druh a frakce se volí podle účelu použití malty:

- a) malty pro výrobu keramických dílců a pro stykové malty frakce 0-4 a 4-8 mm v předepsaném poměru
- b) malty pro zdění, pro kladení dlažeb, pro obklady a po jádrovou vrstvu omítek frakce 0-4 mm
- c) malty na jemné omítky a pro spárování při tloušťce spáry do 4 mm frakce 0-1.

1.2.3. Přísady a příměsi

- Přísady jsou látky, které jsou přidávány do malt v malém množství vzhledem k hmotnosti pojiva před nebo během míchání a slouží k získání určité specifické vlastnosti malty.
- Příměsi jsou jemné anorganické materiály, které se do malt mohou přidávat za účelem zlepšení jejich vlastností nebo k dosažení určitých specifických vlastností.
- tam kde je možnost styku malty s výztuží, nebo ocelovými prvky, je striktně zakázáno užití přísad na bázi chloridů.

1.2.4. Záměsová voda

Voda k výrobě malt z anorganických pojiv musí být nezávadná, tzn. nesmí snižovat pevnost a trvanlivost malty nebo způsobovat skvrny a výkvěty, jedná-li se o malty pro omítání. Bez rozboru lze používat vodu pitnou, vody jiného původu je nutno vyzkoušet obdobně jako vodu pro výrobu betonu. [6]

1.3. Druhy malt

Podle použitého pojiva, resp. kombinace pojiv můžeme malty rozdělit na:

- hlínové
- sádrové
- vápenné
- cementové
- nastavované (vápno-hlínové, vápno-sádrové, vápno-cementové)

Historicky nejstaršími maltami jsou malty hlínové, na bázi jílových hlín, po nich následovaly malty sádrové a nakonec malty vápenné.

1.3.1. Hlínové malty

Hlínových malt se používalo pro spojování nepálených cihel a později také pro omítání staveb z nepálených cihel, kamene nebo dřeva. K jejich výrobě se využíval jíl nebo jílovitá hlína z lokálních zdrojů. Jako plnivo se vedle písku vždy používaly především vláknité materiály – řezanka, štětiny apod., přičemž podíl jednotlivých složek v maltové směsi závisel na kvalitě (vaznosti) použité hlíny. [1]

1.3.2. Sádrové malty

Sádrové malty se používaly a používají především pro omítání a štukové ozdoby v interiérech. Kromě sádry, plniva a vody obsahují většinou ještě zpomalovač tuhnutí, eventuálně i další přísady upravující reologii mokré malty nebo fyzikálně-mechanické vlastnosti výsledné malty. Vzhledem k vlastnostem sádrového pojiva nejsou plniva nezbytná, přesto se používají. Nejčastěji se jedná o písky nebo vápencové drtě, jejichž granulometrie se řídí účelem použití malty. Objemový poměr sádry a plniv bývá 1 : 1, může však být až 1 : 3, většinou se pohybuje na dolní hranici tohoto rozmezí. [1]

1.3.3. Vápenné malty

Malty vápenné obsahují v podstatě jen vápenný hydrát a směs písků nebo drtí, přičemž poměr pojivo : plnivo se v průběhu času mění. U historických malt bylo zpravidla použito poměrně vysokého obsahu vápenného hydrátu, za což mohla poměrně špatná kvalita vápna. Se zlepšující se kvalitou vápna klesal i jeho obsah v maltách, v průběhu renesance se ustálil poměr vápenného hydrátu k písku na hodnotě 1 : 3, a tento je používán i dnes. Poměr samozřejmě závisí i na velikosti zrn použitého písku, takže u jemných (štukových) malt použijeme větší podíl vápenného hydrátu (1 : 2), zatímco v maltách pro zdění, které jsou poměrně hrubé, bude pojiva méně. To platí i pro malty určené pro hrubé (jádrové) omítky.

Zpracovatelnost a přilnavost k podkladu je u vápenných malt výborná. Pokud neobsahují nadměrné množství pojiva nebo záměsové vody, smršťují se během tuhnutí a tvrdnutí jen málo. Tvrdnutí probíhá pomalu a rovněž nárůst pevností je velmi pomalý. Konečné pevnosti v tlaku zatvrdlých, čistě vápenných malt jsou poměrně nízké a zpravidla nepřesahují 0,4 MPa. Pokud byly vápenné malty modifikované organickými přísadami nebo latentně hydraulickými pojivy,

dosahovaly pevností vyšších. Totéž můžeme říci i o maltách na bázi hydraulického vápna, které vlastně tvoří jakýsi přechod od malt vápenných k maltám cementovým. [1]

1.3.4. Cementové malty

Malty cementové obsahují kromě cementu i malé množství vápenného hydrátu, který se zde přidává za účelem zlepšení zpracovatelnosti čerstvé malty. V oblasti památkové péče se cementových malt prakticky nepoužívá, jelikož po zatvrdnutí vykazují mnohem vyšší pevnost a tvrdost než malty vápenné nebo vápenné modifikované malty. Ostatní fyzikální a mechanické vlastnosti jsou rovněž velmi rozdílné, což způsobuje problémy, zejména pokud je cementové malty užito při opravách vápenných omítek. [1]

1.3.5. Vápno-hlínové malty

Vápno-hlínové malty se řadí do skupiny tzv. nastavovaných malt (malty s obsahem dvou pojiv). Zde se pravděpodobně jednalo o snahu zlepšit odolnost zatvrdlých hlínových malt proti působení vody. Poměr jílového a vápenného pojiva byl až 1 : 1. [1]

1.3.6. Vápno-sádrové malty

Skupina vápno-sádrových malt je poměrně široká. Dostáváme se zde od malt vápenných s poměrně malým množstvím sádry až po malty, kde je primárně použita sádra a obsahují jen nepatrné množství vápenného hydrátu, který zde má funkci zpomalovače tuhnutí – tyto malty bychom mohli označovat spíše sádro-vápenné. Vápno-sádrové malty se v našich klimatických podmínkách používají k omítání v interiérech, jejich výhodou je rychlejší nárůst pevnosti a také vyšší konečná tvrdost a pevnost v porovnání s maltami čistě vápennými. Výjimkou je zde období od druhé poloviny 19. stol. do 30. let 20. století, kdy se fasády některých budov upravovaly dvouvrstvou vápno-sádrovou omítkou, kde se jako plniva používalo vápencové drtě. Tyto omítky měly až pozoruhodnou životnost. [1]

1.3.7. Vápno-cementové malty

Vápno-cementové malty se staly od zavedení výroby cementu nejběžnějším typem nastavovaných malt a používají se prakticky pro všechny

účely, tj. jako malty zdicí, omítkové, štukové, spárovací atd. Složení je v podstatě stejné jako u vápenné malty, obsahují však obvykle navíc cca 10 % cementu. To má za následek rychlejší vzrůst pevností v průběhu tvrdnutí a konečné pevnosti zatvrdlé malty jsou rovněž vyšší. Speciální malty, kterých je celá řada, nenacházejí obvykle v památkové péči uplatnění. Výjimku tvoří pouze odsolovací a sanační maltové směsi a do jisté míry i termoizolační malty. [1]

2. Pojiva malt

Jako pojiva označujeme organické nebo anorganické látky, které se mísí s plnivem na směs, které mají vhodnou tvárnost a po zatvrdnutí získají potřebné mechanické fyzikálně chemické a chemické vlastnosti a spolu s plnivem tvoří složené (kompozitní) materiály – malty, betony. [7]

Ve stavební praxi zavádíme ve spojení s pojivy také výraz maltovina. Maltovinou rozumíme anorganické stavební pojivo připravené z vhodných surovin pálením na vysokou teplotu (mnohdy až do meze slinutí), které je schopno po rozemletí nebo vyhašení poskytnout společně s vodou a plnivem zpracovatelnou směs, která tuhne a tvrdne na stavivo dostatečné pevnosti. Toto doprovází vznik nových chemických sloučenin. [7]

Dělení maltovin dle chování v zatvrdlém stavu ve vodě:

- vzdušné maltoviny - po rozmísení s vodou výrobky z nich zhotovené, tuhnou a tvrdnou a jsou stálé jen ve vzdušném prostředí (jíly, sádra, sádrová pojiva, vzdušné vápno, hořečnatá maltovina)
- hydraulické maltoviny - výrobky z nich zhotovené, po částečném zatuhnutí na vzduchu, tuhnou a tvrdnou a mají tvarovou stálost jak na vzduchu, tak i pod vodou (hydraulické vápno, cementy, speciální pojiva).

2.1. Jílové zeminy

Z hlediska historie se jako o prvním pojivu bavíme o hlínách. Tyto hlíny měly vysoký obsah plastických jílových minerálů a zrna do velikosti 0,002 mm. Tvrdnutí malt z nich vyrobených probíhalo postupným uvolňováním vody z vrstevnatých minerálů typu kaolinitu $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, montmorillonitu $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, illitu $n\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ a halloysitu

$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, při kterém docházelo ke smrštění, které vedlo ke vzniku trhlin. [2] [11]

Nevýhody hlíny jako pojiva:

- nízká pevnost (v tlaku cca 0,4 MPa)
- bobtnání v přítomnosti vody
- mrazová nestabilita (znamenal krátkou životnost)

2.2. Síranová pojiva

Spolu s vápnem jsou prvními pojivy vyráběnými tepelným zpracováním suroviny. Nalezena byla ve zbytcích staveb na území Sýrie, jejichž stáří se pohybuje okolo 9000 let. Známá byla také v Egyptě, kde používali sádro a vápno ke spojování kvádrů Cheopsovy pyramidy (2650 př. n. l.). [2]

Surovinami pro výrobu sádry mohou být přírodní sádrovec (v ČR Kobeřice u Opavy) nebo energosádrovec, což je odpadní produkt, který vzniká při desulfataci kouřových plynů při spalování uhlí nebo pak chemosádrovec, který vzniká jako vedlejší produkt různých chemických procesů (výroba titanové běloby nebo kyseliny fosforečné). Z hlediska chemismu se bavíme o síranu vápenatém dihydrátu $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. [21]

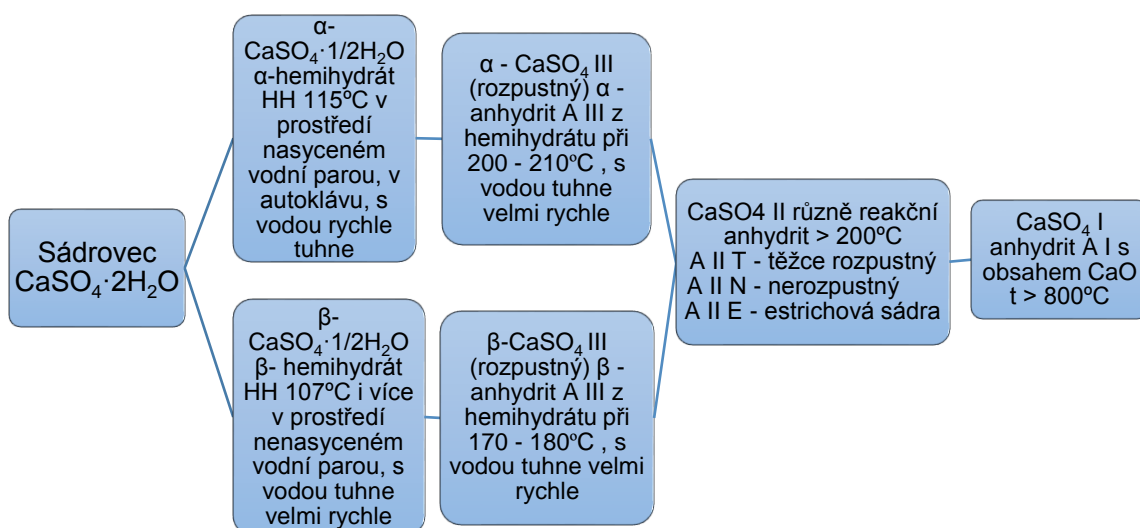


Obrázek 1 - Přírodní sádrovec Kateřinky u Opavy [22]

Tvrdost sádrovce dle Mohse je 1,5 až 2. Má poměrně vysokou rozpustnost, kdy se při 20 °C rozpouští 0,256g ve 100g vody. Je stálý do teploty 40 °C, při teplotách vyšších dochází ke ztrátě vody a přeměně na hemihydrát. [11] [12]

Výroba a použití síranových pojiv jsou založeny na schopnosti výchozích surovin uvolňovat krystalicky vázanou vodu vlivem působení teploty, a tu opět po jejím přidání do takto vzniklého pojiva vázat a vytvořit pevný výrobek. [11] [12]

Obdržená pojiva se výrazně liší ve svých vlastnostech v závislosti na tepelném zpracování. Toto je způsobeno tím, že poměry soustavy $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$, jež se jeví dle chemických rovnic jako poměrně jednoduché, jsou ve skutečnosti mnohem složitější. Postupem, který je patrný ze schématu níže, lze získat různé formy CaSO_4 . Jejich vlastnosti určuje stupeň dehydratace a schopnost opětné hydratace, což závisí na teplotě výpalu a tlaku vodní páry v prostředí, v němž se provádí. [12]



Vsypáním již hotové sádry (produkt vzniklý kalcinací sádrovce) do vody vznikne kaše, která postupně ztrácí tekutost a stává se tuhou. Po zatuhnutí začíná tvrdnout – dochází k rekrystalizaci sádrovce a vzrůstá pevnost. Zvýšení pevnosti můžeme dosáhnout sušením zatuhlé sádry při teplotě 40 °C. Výhoda sádry jako pojiva je v tom, že dosahuje úplné hydratace a konečných vlastností v krátké době (dny). Vzhledem k tomu, že je výsledný produkt hydratace rozpustný ve vodě, je sádra předurčena pro použití výhradně v interiéru a především jako materiál pro malty určené k omítání, nikoliv k výrobě malt zdicích. Abychom sádro mohli používat i v exteriéru, je nutné ji hydrofobizovat a to:

- hydrofobizace vnitřní (přídavek hydrofobizačního činidla do směsi)

- hydrofobizace vnější (ošetření povrchu nejlépe organokřemičitým hydrofobizačním prostředkem, dříve se používalo lněné fermeže) [11]

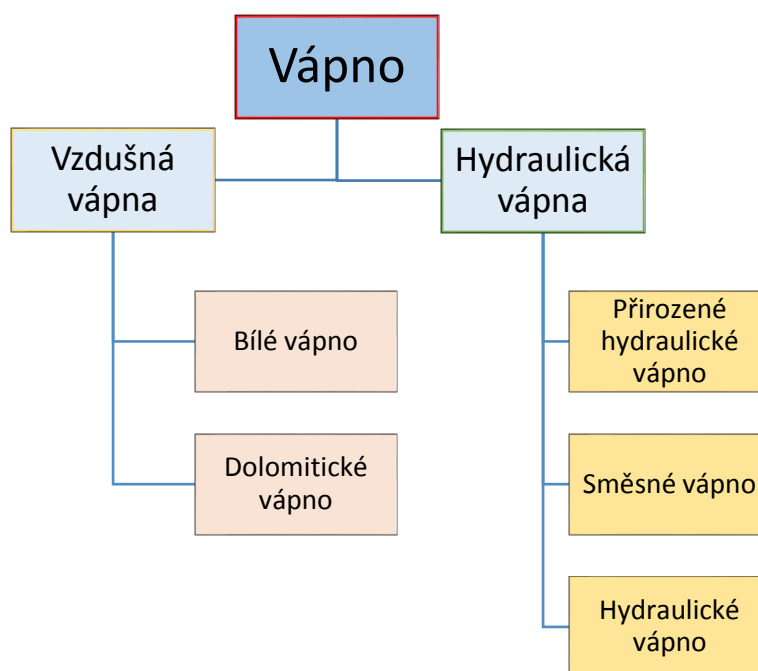
V minulosti se používaly speciální druhy sádrových maltovin, které byly vyvinuty pro zlepšení vlastností zatvrdlého produktu. Tyto sádry se hojně používaly v exteriéru (Keenova sádrovina, parianská sádra, Scottova sádra a de Wyldeho sádra). Byly páleny ze sádrovce a dalších materiálů, které zlepšovaly jejich vlastnosti (kámen, vodní sklo, borax a další). [11]

- Keenova (cement) sádrovina – pálení sádrovce s kamencem hlinitodraselným za teploty 600 °C
- Parianská sádra – pálení sádrovce s boraxem, záměsová voda nahrazena vinanem draselným
- Scottova sádra – pálení sádrovce s vápnem až do slnutí v poměru 7:3
- De Wyldeho sádra – pálení anhydritu (CaSO_4) s vodním sklem při teplotě 200 °C

Není vhodné, aby malty sádrové a sádrovápenné přišly do styku s hydraulickými pojivy. V případě, že by se tak stalo, může dojít vlivem působení vlhkosti ke vzniku ettringitu nebo thaumasitu, které při krystalizaci vytvářejí molekuly způsobující rozpad malt. K tomu dochází, např. tehdy, když jsou vápenocementové omítky aplikovány na zdicí nebo spárovací malty s obsahem sádry. [11]

2.3. Vápenná pojiva

Dle ČSN EN 459-1 [23] se vápna dělí na vzdušná a s hydraulickými vlastnostmi. Vzdušná vápna: bílé a dolomitické vápno. Vápna s hydraulickými vlastnostmi: přirozeně hydraulické vápno, směs vápno a hydraulická přísada (pucolán). Vzdušná vápna jsou definována sumou $\text{CaO} + \text{MgO}$, hydraulická pevností v tlaku.



Nejkvalitnější vápno se získá pálením čistých vápenců. Kvalitu vápna určuje především aktivita vápna, která je stanovena měřením vzrůstu teploty při hydrataci, dále pak vydatnost, která je stanovena objemem vápenné kaše při reakci páleného vápna s vodou za standardních podmínek [l/kg vápna]. Dalším důležitým krokem při pozorování kvality vápna je stanovení objemové stálosti a obsahu částic přepáleného nehašeného vápna. Metody pro zkoušení vlastností vápen jsou uvedeny v ČSN EN 459-2. [24]

Hlavní složkou průmyslově vyráběných vápenatých sloučenin jsou oxid vápenatý CaO a hydroxid vápenatý $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Uplatňují se nejen jako pojivo ve stavebnictví, ale i pro jiná průmyslová odvětví např. zemědělství a lesnictví a to vzhledem k vlastnostem CaO .

Vápenná pojiva:

- vápno – v podstatě oxid vápenatý, někdy obsahující i MgO (oxid hořečnatý)
- vápenný hydrát – hydroxid vápenatý Ca(OH)_2 neboli hašené vápno
- karbidové vápno – vápenný hydrát, který vzniká při zpracování karbidu vápníku CaC_2
- hydraulické vápno – obsahuje kromě oxidu vápenatého určité množství hydraulických složek (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3)

Vápno, vápenný hydrát, karbidové vápno a slabě hydraulické vápno patří do skupiny tzv. vzdušných maltovin (tuhnou a tvrdnou pouze ve vzdušném prostředí a jen v něm jsou stálé).

Silně hydraulické vápno a románský cement řadíme do skupiny hydraulických maltovin (tuhne a tvrdne i ve vodě a je stálé ve vodním prostředí. [7]

2.3.1. Historie vápenných pojiv

Vápno, které bylo používáno ve stavebách starých kultur, se nejdříve používalo jako vzdušná maltovina. Ovšem již v 10. století př. n. l. Féničané zjistili, že smícháním vápna s cihelnou moučkou vznikne v konečné fázi zatvrdlé pojivo, které se však svými vlastnostmi liší od toho, které bylo připraveno z čistého vápna. Takto připravené pojivo vykazovalo větší pevnosti, po zatuhnutí na vzduchu bylo stálé a nabývalo pevnosti i pod vodou. Také Řekové mísili vápno se santorinským pískem, protože vápno s přídavkem lávové hlíny dalo vzniknout maltě, která byla po zatvrdnutí stálá i pod vodou. Podobně tak Římané používali do směsi s vápnem sopečný popel z oblasti Puzzuoli pod Vesuvem. Z toho je také odvozen název materiálů podobného složení „pucolán“. Útlum používání pucolánů jsme zaznamenali ve středověku, kdy se pozapomnělo na hydraulicitu a pucolánové vlastnosti některých přírodních materiálů. [2]

Důležitým milníkem bylo vnesení chemických zásad do výroby hydraulických pojiv L. J. Vicatem, který provedl rozbor řady vápenců a rozpoznal úlohu jílu v surovině, čímž odstartoval výrobu hydraulického vápna. Ukázal na možnost dodání jílových minerálů do suroviny, pokud nejsou přirozeně obsaženy ve vápenci. Tyto minerály vnáší do pojiva tzv. hydraulické oxidy, SiO_2 , Al_2O_3 a

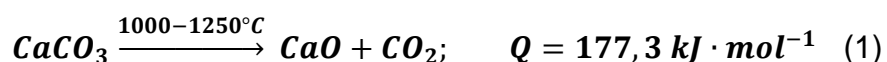
Fe_2O_3 . Pokud podíl jílu v surovině vzroste na 33 – 40 %, vápna se nehasí a s vodou vytvoří velmi rychle zatvrdlou pastu, která je stálá i pod vodou. [2]

V našich zemích se začalo s používáním vápna v 10. století. První vápenku vlastnil klášter v Břevnově. Celkově byla vápenická oblast v okolí Prahy významná (Radlice, Podolí, Zlíchov) a vápno velmi ceněno. Exportováno bylo např. do Itálie pod názvem „Pasta di Praga“ a později se dostalo i do Anglie. Kvalita byla dána výpalem z vápenců s vysokým obsahem hydraulických složek. Dalším používaným vápnem bylo kaufsteinské z Tyrol, které bylo vysoce hydraulické a dodnes se na stavebních objektech velmi cení. [2] [9]

Druhá polovina 19. století znamenala rozvoj i pro vápenictví. Došlo k přechodu z primitivních šachtových pecí na vlastní tah na pece kruhové. Závody se začaly budovat u zdrojů vápence, nikoliv u spotřebitele. Na začátku 20. století už bylo jen v oblasti Barandienu přes 40 vápenických pecí. [2] [10]

2.3.2. Vápno

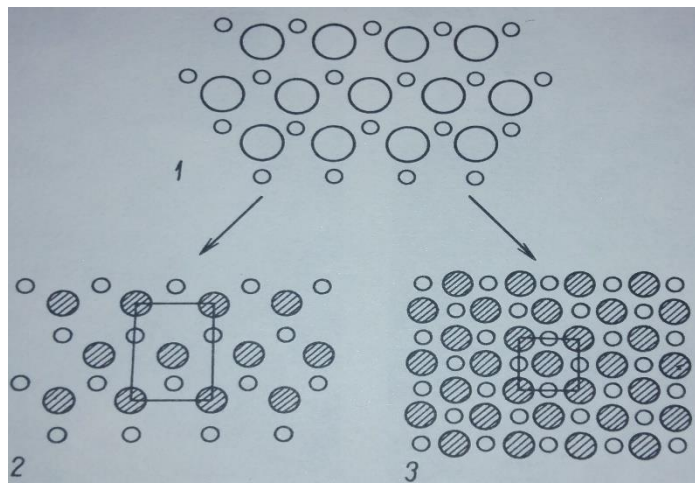
Výroba čistě bílého vápna je založena na rozkladu uhličitanu vápenatého CaCO_3 (vápenec) v šachtových nebo rotačních pecích při teplotách 1000 až 1250 °C takovým způsobem, kdy nenastane slnutí získaného oxidu vápenatého CaO . Během rozkladu (1) uniká oxid uhličitý CO_2 , což má za následek vysokou pórovitost, resp. velký vnitřní povrch, vypáleného vápna. [12]



Reakce vyžaduje dodání tepla a probíhá při vysokých teplotách. Přepočteme-li spotřebu zvýšenou i o tepelné ztráty na 1 kg CaO , dostaneme se na hodnotu 3200 kJ. Teoretické zmenšení hmotnosti vápence je 44 % (CO_2), zmenšení objemu pak pouze 10 – 20 %. [12]

Způsob a rychlost pálení a rychlost chlazení spolu s vlastnostmi vstupní suroviny určují kvalitu vypáleného produktu. Při nižších teplotách a delší době výpalu je mikrostruktura velmi pórovitá a není stabilní, což způsobuje značnou energii při reakci s vodou. Takto vypálené vápno nazýváme měkce pálené – reaktivita je vysoká a produkt je nekonsolidovaný; má nízkou objemovou hmotnost (kolem $1200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$). [12]

Při vyšší teplotě a době výpalu nastane tzv. shromažďovací krystalizace, při které se zvyšuje objemová hmotnost a snižuje pórovitost. Tato vápna nazýváme ostře pálená – reaktivita je nízká a produkt je konsolidovaný; má vysokou objemovou hmotnost (např. $2500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$). [12]



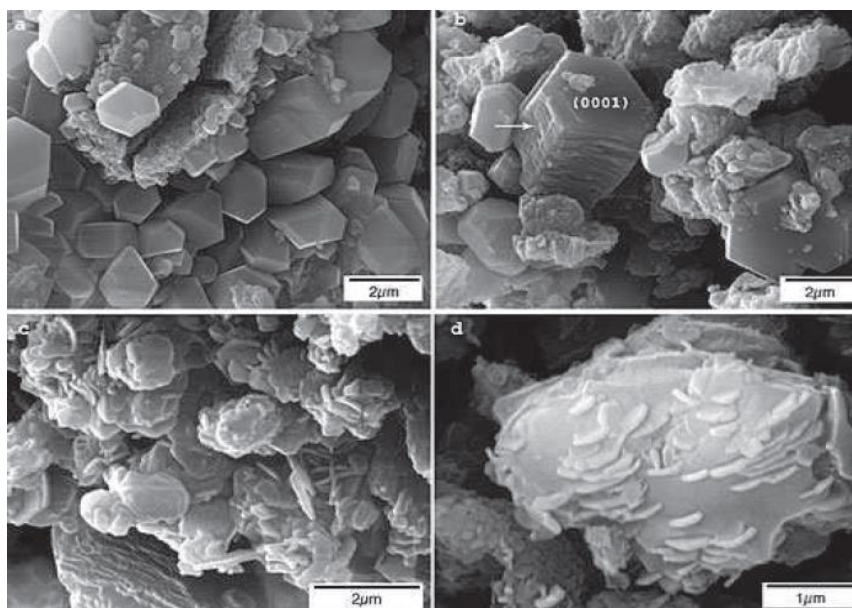
Obrázek 2 - Schéma změny klencové krystalové mřížky při výpalu kalcitu
1- CaCO_3 , 2 – CaO – klencová, 3 – CaO – kubická [12]

2.3.3. Vápenný hydrát

Vápenný hydrát neboli hydroxid vápenatý $\text{Ca}(\text{OH})_2$, vzniká reakcí páleného vápna CaO s vodou. Tuto reakci nazýváme jako hašení vápna (2) a probíhá za silného vývoje tepla.



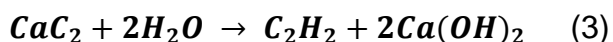
Z toho vyplývá, že z 1 kg vápna bychom měli získat 1,32 kg hydrátu při uvolnění 1163 kJ tepla. Množství vody je teoreticky dáno jako 32,16 %. Malty vyrobené z hydrátu mají díky jeho plastičnosti dobrou zpracovatelnost, jak je tomu u odleželých kaší. Vápenný hydrát by neměl obsahovat nevyhašená zrna vápna, jelikož při použití na malty omítkové by mohlo vlivem vlhkosti docházet k dodatečnému hašení a tím k tzv. střílení omítky. Kvůli tomuto je nevhodné připravovat hydrát pro omítky z ostře páleného vápna. [12] [21]



Obrázek 3 - Mikrostruktura hašeného vápna: a – krystaly portlanditu v čerstvé kaši; b – 2 měsíce; c – 6 měsíců; d – 2 roky odležení [26]

2.3.4. Karbidové vápno

Jedná se o zvláštní druh vápna, který vzniká při výrobě acetyleny z karbidu vápníku (3). Takto vzniklé vyhašené vápno má šedofialovou barvu způsobenou zbytky koksu z výroby karbidu a zvláštní zápach. [12]



2.3.5. Hydraulické vápno

Vápna, která díky přítomnosti hydraulických součástí (SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3) řadíme mezi hydraulické maltoviny, jsou po zatvrdnutí charakteristická vyššími pevnostmi než vzdušná vápna a jsou ve vlhkém prostředí stálá. Dá se říct, že svými vlastnostmi a složením stojí na hranici mezi vápnem vzdušným a cementem. [11] [12]

Hydraulická vápna dělíme dle způsobu výroby na:

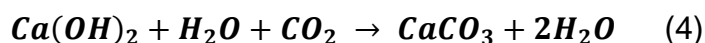
- Přírodní – získávají se pálením vápenců, které obsahují hydraulické součásti, avšak pálíme je pod mez slinutí.
- Umělá – získávají se rozemletím vzdušného, nebo i hydraulického vápna s vhodnými příměsemi.

K výrobě jsou používány vápence s obsahem jílu (cca 65-75 % CaCO_3). Pálící teplota je max. 1250 °C – stádium suchého slinování – vznikají slínkové minerály (C_2S , C_3A , C_4AF) avšak nevzniká C_3S alit, pro který je potřeba teplot ještě vyšších a je typický pro cement.

2.3.6. Tuhnutí a tvrdnutí vápna

Tuhnutí a tvrdnutí vápenného hydrátu probíhá ve dvou vzájemně se prolínajících fázích:

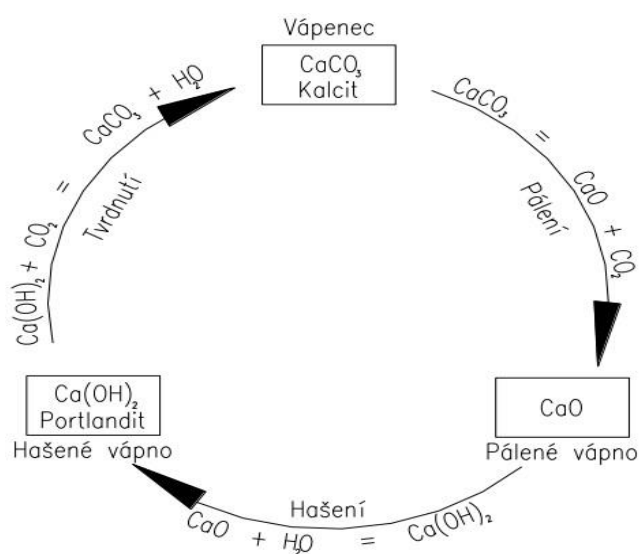
- koloidní sesychání – je vyvoláno odpařením vody, čímž se přiblíží zrna hydroxidu a tím mohou být využity jejich přitažlivé síly
- karbonatace $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – vznik krystalického kalcitu (4)



$$Q = -11,4 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Jedná se o exotermickou reakci a voda při ní uvolněná přispívá s vodou záměsovou k vlhkosti stavby. Karbonatace probíhá v období 4 – 6 týdnů, při množství 0,3 – 0,4 % vody v maltě, velmi rychle. Po této době je průběh karbonatace už jen pozvolný a u masivních konstrukcí může tento proces probíhat desítky až stovky let. [11] [12]

Na obrázku 4 je patrný koloběh vápna, který zahrnuje přechod od výpalu vápence přes hašení páleného vápna až po karbonataci hydroxidu.



Obrázek 4 - Vápenný cyklus [11]

2.4. Cement

2.4.1. Historický vývoj cementu

Název cementu má původ v latinském slově „caedere“ tj. tlouci. Ve starém Římě se tímto výrazem označoval i lomový kámen. K modernímu pojmu slova „cement“ se došlo náhodně přeložením slova caementa jako „ciment“. Odtud se tento výraz přenesl do odborné literatury, kde označoval maltovinu tvrdnoucí pod vodou.

Anglický inženýr J. A. Smeaton v roce 1756 postavil maják v Eddystonu za použití hydraulické maltoviny. Ta se v zatvrdlém stavu svou barvou a vlastnostmi podobala stavebnímu kameni z okolí Portlandu a odtud tedy dostal křemičitanový cement přívlastek „portlandský“. Patent byl pak přiznán v roce 1796 Jamesi Parkerovi z Northfleetu, který rozmělnil vápenec s vhodným obsahem jílových složek a páčil jej v peci téměř do slinutí. Tento výrobek pak nazval románským cementem, kvůli barevné podobnosti s pojivem starých Římanů.

Dalšího pokroku v poznání hydraulicity cementu dosáhli němečtí badatelé J. F. John a J. N. Fuchs. John se zabýval rozdíly ve vlastnostech maltoviny při výpalu kusového a lasturovitého vápence společně s jíly. Fuchs již sledoval poměry složek v surovině, tj. oxidu vápenatého a hydraulických oxidů. [2] [9]

Na území Čech byla první cementárna postavena v roce 1860 v Bohosudově. V roce 1868 pak firma Ferdinand Bárta & Comp. založil cementárnu v Podolí.

V polovině 19. století se začal vyrábět struskový cement, který byl tvořen jemně mletou vysokopecní granulovanou struskou a práškovým vápenným hydrátem. Tento tzv. struskový cement byl vyráběn ve Vítkovicích a Králově Dvoře. [2] [9]

2.4.2. Portlandský cement

Dle ČSN EN 197-1 [25] je cement hydraulické pojivo, pálené nad mez slinutí tj. jemně mletá anorganická látka, která po smíchání s vodou, v důsledku hydratačních reakcí a procesů, tuhne, tvrdne a po zatvrdnutí zachovává svoji pevnost a stálost jak na vzduchu, tak i ve vodě.

Vyrábí se výpalem surovinové moučky, která je složena z:

- vápence – cca 75 % surovinové moučky, vhodnější jsou slínité vápence, jelikož mají vyšší reaktivitu než vápence vysokoprocentní
- zeminy - zpevněné: břidly, břidlice, (drcení a mletí na 60 μm)
 - nezpevněné: jíly, hlíny (drcení, mletí) rozplavování (pro mokré způsob), částice 2 – 20 μm

Chemicky obsahují čtyři základní oxidy a to CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 . Dále je pro portlandský cement charakteristický obsah slínekových minerálů C_3S (alit), C_2S (belit), C_3A (trikalciumaluminát), C_4AF (brownmillerit). [21]

3. Plniva malt

3.1. Dělení malt dle plniva

Dle druhu plniva dělíme malty na:

- s říčním pískem
- s kopaným pískem
- se smíšeným plnivem (směs obou druhů písků, směs těžného a drceného písku)
- s druhotnými odpadními hmotami (cihelňá drť, popílek, struska, sláma, plevy aj.)

Obecně je písek definován jako nezpevněná sypká usazenina, kde velikost zrn je 0,02 – 2 mm. Dále je pak přítomen proměnlivý objemový podíl jemnozrnného siltu nebo jílu a hrubozrnnějších částic štěrku. [15]

Hlavní složkou v maltě je pojivo, avšak na pevnosti, tvrdosti a struktuře omítek se podílí stejnou měrou právě plnivo. [5]

3.2. Plniva anorganická

Jak bylo řečeno, plniva tvoří druhou ze základních složek malt. V maltách na bázi vápenných pojiv bylo plnivem kamenivo a to ve všech historických obdobích. Dá se říct, že kvalita kameniva rozhodovala i o kvalitě malty, což dokazují výsledky všech dnešních výzkumů. [15]

Plnivem byl většinou písek, který však nemusel být výhradní složkou malty, jelikož jsou známy malty, kde se jako plniva používaly drtě a moučky z mramorů a dolomitu, které dávaly světlé barevné tóny (uplatnění zejména u malt pro omítání). Většinou se však používaly písky, které se získávaly ze zdrojů blízkých stavbě.

Velký význam kvality písku byl znám již Římanům, o čemž víme z Vitruviových knihy o architektuře. Mimo jiné v ní zmiňuje, že na kvalitní malty je třeba písku, který neobsahuje hlínu. Dále pak píše o využití písků říčních, pakliže není v okolí stavby jiný zdroj písku a hned nato vylučuje použití písku těžného na mořském pobřeží – nesmí se používat ke zdění kleneb, při jeho porušení dochází k rozrušení stavby. Čerstvý kopaný písek je dle něj pak vynikající pro maltu zdicí, nikoliv však pro omítky, kde malta vlivem rychlého vysychání praská. Tyto poznatky platí dodnes. [15]

V dnešní době je požadavek na kvalitu písku definován normou, kde se surovina hodnotí dle druhu velikosti, tvaru stálosti, pevnosti, nasákavosti zrn a obsahu závadných látek. Nejlepší písky jsou z křemenných zrn a mají plynulou křivku zrnitosti – to v praxi znamená i malou mezerovitost a s ní rostoucí hutnost. Rozložení velikosti zrn v písku ovlivňuje propustnost, pevnost, smrštivost a trvanlivost malty. Problémy jsou s otvíráním přírodních lokalit se zásobami písku, které maximálně splňují požadavky na ideální složení zrn. [5]

3.3. Plniva organická

Mezi plniva organická můžeme zařadit mj. rostlinná vlákna, zvířecí chlupy, slámu a pazdeří, které byly používány do omítkových malt za účelem jejich vyztužení. Zvláště v omítkách s určitým obsahem jílu tato plniva částečně eliminovala smrštění (zabránění vzniku trhlin). Dnes se přírodní vlákna nahrazují především polypropylenovými vlákny, která jsou stálá v zásaditém prostředí čerstvé malty, anebo v některých případech vlákny skleněnými. [11]

Vlákna přidaná do vápenných malt zlepšují objemovou stabilitu při tunutí a tvrdnutí. Smrštění je v případě přidaných vláken více než o 4 % menší než u malt bez vláken. U vláken s převažujícím délkovým rozměrem (polypropylenová vlákna, chlupy) smrštění klesá v závislosti na množství přidaných vláken. Naopak

u vláken s vysokou nasákavostí (piliny, plevy) smrštění se zvyšujícím se množstvím roste. [27]

3.4. Barviva

Barevné pigmenty jsou také neopomenutelnou složkou zejména malt pro omítání a můžeme je zařadit do kategorie plniv. Probarvování malty můžeme rozdělit na:

- přísadu (barevný pigment) dáváme do čerstvé malty – probarvení v celém objemu
- povrchové barvení malty v podobě nátěru

U malty zdicí nepřikládáme probarvování prakticky žádný význam, protože není kladen požadavek na estetickou funkci. [15]

4. Přísady a příměsi do malt

V oblasti historických vápenných malt jsou vápno a písek hlavní, nikoliv však jediné složky. Od počátku vývoje malt byla snaha (která trvá dodnes) zlepšit vlastnosti čerstvé i zatvrdlé malty přidáním dalších látek. [5]

4.1. Organické přísady

Z dochovaných pramenů víme, že již přibližně 3000 let př. n. l. používali na území Mezopotámie asfalt ve směsi s hlínou a slámou jako voděodolný materiál. Přibližně ve stejné době se v Egyptě používalo vápnosádrových malt, případně hliněná malta vyztužená vlákny. Později, přibližně ve 3. století př. n. l. používali Egypťané vrstvu křídý pojenou kliehem.

Ve starověkém Římě pak používali k regulaci vlastností stavebních materiálů látek, jako jsou vepřové sádlo, žitné těsto, sražené mléko, krev či vaječný bílek. Vitruvius (84 – 10 př. n. l.) ve svém proslulém díle „10 knih o architektuře“ popisuje použití proteinů pro zpomalení tvrdnutí sádry a použití sušené krve jako látky pro zlepšení cirkulace vzduchu v materiálu.

Na území Asie se používalo bobů, květín, dužiny z ovoce nebo listy různých stromů, které se namáčely v olejích. Vzhledem k nízké odolnosti malt se kvůli posílení v prvních dnech používalo organických vláken.

V Byzantské říši (od 5. století n. l.) se kvůli nedostatku anorganických surovin používalo výhradně organických přísad – klij, ovesná mouka, sacharidy (pivo, med) organické kyseliny (jablečná šťáva). V některých případech se tradovaly i velice iracionální postupy, které měly spíše duchovní význam např. vyhazování mrtvých koček do jam s vápnem.

V období gotiky se kvůli dlouhému tuhnutí a tvrdnutí malty (často i několik měsíců) objevily první pokusy použít přísady urychlující tuhnutí a tvrdnutí malty. Používaly se běžné dostupné suroviny např. bílkoviny (vaječný bílek), přírodní cukry (pivo, med) a jiné. Po opuštění technologie lité klenby se místo snahy o urychlení tuhnutí a tvrdnutí začaly používat nové, pokrokovější technologie – zdění kleneb s využitím kamenných žeber. [28] [29]

Tabulka 1 - Přísady do malty v jednotlivých historických obdobích [15]

Přísady do malty	Období Egypta	Říše římská (Vitruvius)	Středověk	Novověk	19. století (Vicat, Burnell)
arabská guma	♦		♦		♦
cukr			♦		♦
kasein	♦				
krev	♦	♦	♦	♦	♦
kvas			♦	♦	
lepek			♦	♦	
melasa					♦
mléko		♦		♦	♦
moč			♦		
ovocné šťávy	♦	♦		♦	
pivo			♦	♦	
podmáslí				♦	
rostlinné pryskyřice				♦	
saze, dřevěné uhlí		♦	♦		
tvaroh		♦		♦	♦
vaječné bílky	♦	♦	♦	♦	♦
vejce	♦		♦	♦	♦
víno		♦			
vlákna rostlinná		♦			
vlasy, chlupy		♦	♦		
živočišné tuky	♦			♦	♦

Jednou z hlavních nevýhod přísad živočišného či rostlinného původu je nebezpečí biologické koroze. Tento problém je tak závažný, že nelze tyto přísady do malt používat při obnovách ani v případě jasně prokázaného pozitivního účinku na maltu. Další z důležitých proti je neudržitelnost stejné kvality malty.

4.2. Syntetické přísady

V dnešní době stojíme před rozhodnutím, zda dodržet původní recepturu pro výrobu malt (zachovanou písemně či odvozenou analyticky), nebo zda bude lepší použít moderní syntetické hmoty, které však mají identické účinky. Tyto přísady jsou samozřejmě účinnější. Většina je stavěna na makromolekulární bázi akrylátů, polyvinylacetátů a jejich kopolymerů. Tyto přísady zlepšují vlastnosti čerstvé malty, zvyšují její přidrženost, paropropustnost, retenci vody nebo hydrofobitu a pevnosti. Volíme je též s ohledem právě na možnou biologickou korozi malty. Porovnání přísad historických a současných s podobnými účinky ukazuje tabulka 2. [2] [15]

Tabulka 2 - Přísady do malt používané v minulosti a v současnosti [15]

Typ přísady	V minulosti používané přírodní látky	Současné typy syntetických látek
Urychlovače	vaječné bílky, krev, cukr	chlorid vápenatý, trietanolamin
Zpomalovače	borax, melasa, cukr	kyselina vinná, její soli, lignin
Plastifikátory	mléko, vaječné bílky, tuky rostlinné i živočišné	lignosulfonáty, akrylové latexy, melami-naldehydy
Provzdušňovačla	slad, pivo, moč	lignosulfonáty, hydroxid barnatý
Utěsňující činidla	bitumen, vosky, živočišné tuky s taninem	stearáty, silikony
Adheziva	kasein, kliš, kalafuna, želatina	akrylová pryskyřice, latex, epoxidy
Zpevňovače	melasa, sirup, vlákna	cement, polyuretany
Ztužovací činidla	krev, kasein, tvaroh, želatina	silikagel, akrylové kopolymery

4.3. Anorganické příměsi do malt

Anorganické příměsi do malt dělíme v zásadě do dvou skupin, kterými jsou:

- Příměsi I. druhu – inertní – kamenné moučky (fillery), práškové pigmenty barevných tónů

- Příměsi II. druhu – pucolánové nebo latentně hydraulické – popílek, křemičitý úlet atd.

4.3.1. Pucolány

K účelu oprav historických staveb se uplatňují pojiva, která korespondují s původním složením. Nelze dosáhnout naprosté identity a to ani v případě použití stejných surovin, zpracovaných v modelu původního výrobního zařízení, ani stejným postupem při zpracování malty. Stejně tak však nelze simulovat proces rekrystalizace pojiva v průběhu několika století, při změnách teplot, vlhkostí vzduchu a pod vlivem agresivních látek.

Je kladen požadavek na vápenné technologie tzn. malty pro zdění, omítání a nátěry na bázi vzdušného vápna. Odolnost vápenných technologií můžeme zvýšit přidavkem „pucolánu“, který při vhodném výběru dokáže zvýšit pevnosti malt a zlepšit odolnosti vůči agresivnímu prostředí.

Označení pucolán má dva rozličné významy. První označuje sopečný popel, který zužitkovávali Římané k výrobě malty s hydraulickými vlastnostmi, kterou připravovali z vyhašeného vápna a sopečného popela z okolí dnešního Pozzuoli (tehdy Puteoli) na jihu Itálie – odtud název pucolán. Pucolány s uvedenou genezí vzniku nazýváme též pravými pucolány – sopečné popely vyznačující se vysokým obsahem SiO_2 . [2] [4]

Druhý význam zahrnuje všechny anorganické látky, ať už přírodní či uměle vyrobené, které za přítomnosti vody a hydroxidu vápenatého tuhnou, tvrdnou a jsou stálé i ve vodě. [4]

V dnešní době již nemusí být pucolány čistě přírodní, ale známe též tzv. technogenní (cíleně připravené nebo odpady).

Přírodní pucolány:

- tufy
- pemza
- diatomitová zemina
- spongility
- perlit

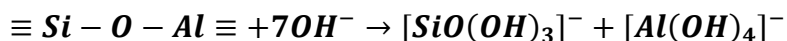
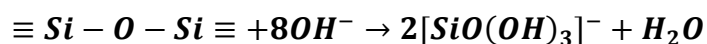
Technogenní pucolány:

- pálené jíly
- cihelný prach a drť
- metakaolin
- elektrárenské popílký

4.3.2. Pucolánová reakce

Při reakci pucolánu s hydroxidem vápenatým vznikají obdobné produkty jako při hydrataci portlandského cementu, tj. C-S-H fáze a hexagonální hlinitany C_4AH_{13} .

Poměr C/S v C-S-H fázích je různý, a závisí na typu pucolánu, době a teplotě ošetřování a poměru vápno/pucolán. Obecné schéma této reakce je:



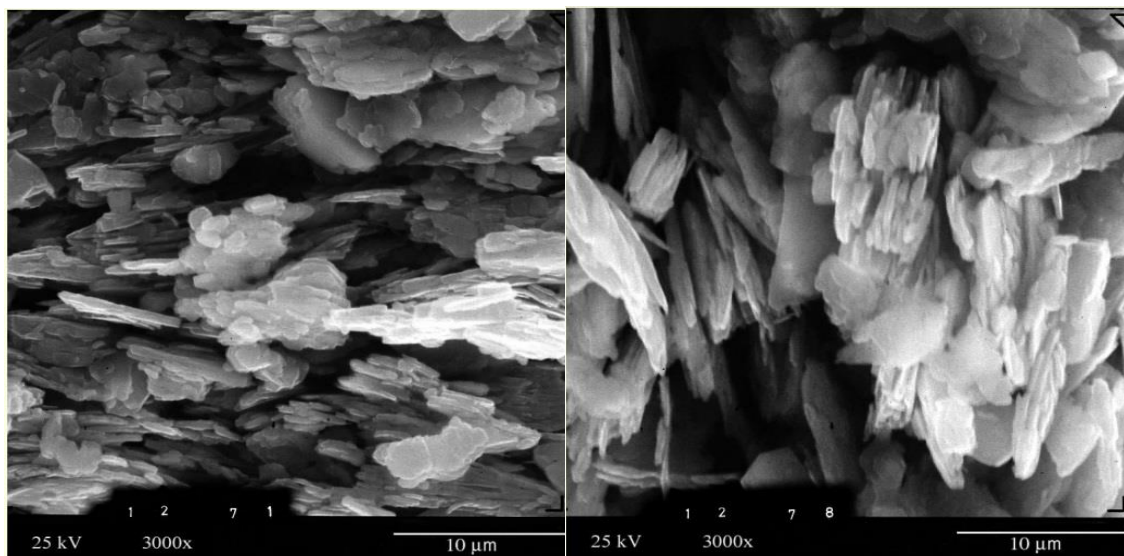
4.3.3. Metakaolin

Metakaolin je hlinitokřemičitý materiál, vyrobený výpalem kaolinů, kaolinitických jílovů v teplotním rozsahu 600 – 900 °C. Základní složkou kaolinu je jílový minerál kaolinit ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$). Teplotní pásmo, ve kterém se pálí, je dostatečně vysoké k tomu, aby došlo ke ztrátám molekul vody a zároveň dost nízké, aby nevznikala sklovitá fáze, a nedocházelo tak ke krystalizaci dalších fází, jako např. mullitu. Takto vzniká minerál metakaolinit. [16] [17] [18]

Metakaolin je vysoce aktivní pucolán. Jeho hlavními složkami jsou SiO_2 a Al_2O_3 . Pucolány mají schopnost získávat pojivové vlastnosti reakcí s hydroxidem vápenatým $Ca(OH)_2$ za přítomnosti vlhkosti, za vzniku kalciumsilikátů a aluminátů. Zároveň snižuje pronikání škodlivých iontů do betonu (omezení tvorby výkvětů). [17]

Metakaolin se mele na prášek a následně se třídí. Hrubší frakce se používají do omítek, štuků, malt a betonových směsí. Jemné vytříděné frakce se využívají do izolačních systémů, protipožárních systémů, jako plnivo kompozitních materiálů, přísada do tmelů, u vybraných aplikacích může nahradit

křemičitý úlet. Dále se může přidávat se do malířských nátěrů, barviv a pigmentů a také se používá pro výrobu alkalicky aktivovaných materiálů. [17] [19]



Obrázek 25 - Mikrostruktura kaolinitu (vlevo) a metakaolinitu (vpravo) [8]

4.3.4. Tras

Trasy, které se používají pro průmyslovou přípravu trasvápenných maltových směsí, jsou ve většině případů vulkanického původu (tufové rýnské a rakouské trasy). Jediným místem v Evropě, kde tras vznikl dopadem meteoritu, je kráter „Nordlinger Ries“ na západě Bavorska.

Při průzkumech z 60. let minulého století byla zjištěna přítomnost křemičitých minerálů (stishovit a coesit), které mohou vzniknout pouze za řádově vyšších teplot a tlaků, než kterých je dosaženo vulkanickou činností. Toto potvrdilo vznik trasu právě dopadem meteoritu. Vzniklá hornina se nazývá suevit, resp. suevitský, někdy také bavorský tras. [30]

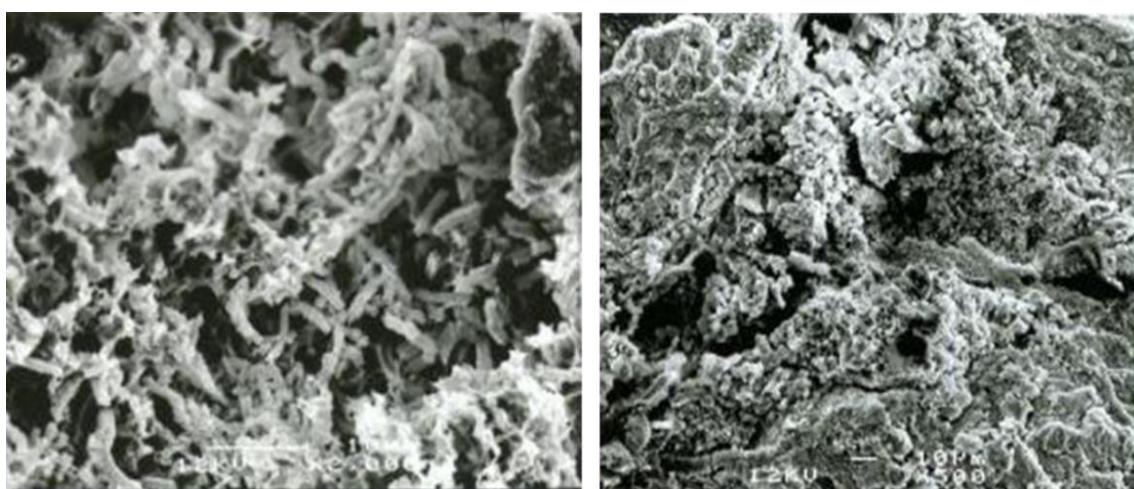
4.3.5. Suevitský tras

Laboratorními zkouškami bylo prokázáno, že suevitský tras obsahuje malé množství reaktivních minerálů, které mohou v průběhu zrání malty, případně po jejím vyzrání způsobit vznik škodlivých solí.

Díky relativně vysokému obsahu amorfního SiO_2 , který velmi dobře reaguje s Ca(OH)_2 (hašené vápno) za vzniku ve vodě nerozpustného kalciumsilikáthdrátu (CSH), vykazují malty modifikované suevitským trasem (v

porovnání s jinými trasy), zvýšenou odolnost vůči agresivnímu prostředí, zejména pak vůči kyselým deštům. Ty způsobují rozklad pojiva za vzniku solí, které svými krystalizačními tlaky poškozují vápenné malty.

Vysoká pórovitost suevitského trasu má pak za následek výrazné snížení kapilárního transportu vody (omezení vztlínání vody, zavlhčování z provlhlého zdiva, příp. zavlhčování deštěm). Zároveň je zachována vysoká propustnost malty. Na obrázku 7 je patrný rozdíl v pórovitosti suevitského a rýnského trasu. V tabulce 3 je pak uvedeno chemické složení těchto trasů, vyjádřené obsahem oxidů. [30]



Obrázek 6 - Porovnání pórovitosti trasů - suevitský (vlevo) a rýnský tras (vpravo) [30]

Tabulka 3 – Chemické složení trasů (vyjádřeno obsahem oxidů). *) amorfni SiO_2 [30]

Prvek	Suevitský tras	Rýnský tras
$\text{SiO}_2^{*)}$	63,0 - 69,0 %	50,0 - 60,0 %
Al_2O_3	12,0 - 16,0 %	17,0 - 19,0 %
CaO	3,5 - 9,0 %	< 5,0 %
Fe_2O_3	4,0 - 6,0 %	3,0 - 5,0 %
MgO	2,0 - 4,0 %	5,0 - 8,0 %
SO_3	> 1,5 %	< 1,0 %

4.3.6. Přínos trasu pro modifikaci malt pro historické budovy

Historické (vápenné) omítky zrály (získávaly pevnost) velmi pomalu a jen díky tomu bylo zamezeno vzniku smršťovacích trhlin. V dnešní době je požadováno zrání rychlé s absencí smršťovacích trhlin. Relativně vysoká pucolánová aktivita (míra schopnosti amorfního SiO_2 reakce s Ca(OH)_2 za vzniku křemičitanů vápenatých) jemně mletého suevitského trasu to umožňuje, je však nutné udržet trasvápené malty vlhké 5 – 7 dnů, jelikož pro pucolánovou reakci je přítomnost vody nezbytná (za sucha neprobíhá). Za těchto podmínek probíhá vývoj pevností kontinuálně – čím vyšší je pucolánová aktivita trasu, tím vyšší je i konečná pevnost omítek. Z tohoto hlediska jsou malty s obsahem suevitského trasu jednou z optimálních možností při rekonstrukci historických objektů. [30]

5. Některé historické postupy přípravy vápenných malt

Složení historické malty, a někdy dokonce i způsoby nanášení či použité nástroje, lze zpravidla posoudit již vizuálně. Složitější je to však s dochovanými doklady o postupech přípravy tradičních malt. Dovednosti spojené s přípravou vápenných malt, které byly po generace předávány, se začaly přibližně před sto lety vytrácet a dochované písemné doklady jsou jen kusé a velice stručné.

Ovšem v některých zemích (zejména na venkově) se tyto tradiční postupy stále používají. Jinde se naopak stávají vedle oblasti rekonstrukcí moderním materiálem u alternativní výstavby. Díky tomuto se tak maltám věnuje čím dál tím větší pozornost.

I v české literatuře lze najít doklady o tradičních postupech výroby malt, avšak jsou zde vynechány, či dokonce zpochybňovány některé zásadní kroky (vliv vodního součinitele, míchání a odležení malty). [14]

5.1. Příprava malty z vápenné kaše

Jedním z tradičních postupů přípravy vápenné malty je příprava z vápenné kaše a písku. Tato malta se dříve používala především na jemnější práce, jako jsou omítky, štuky, římsy a další estetické prvky stavby.

Jako pojivo se používalo vzdušné vápno ve formě vyzrálé vápenné kaše, plnivem byl písek nebo štěrkopísek vhodné skladby a složení. Vápenná kaše pro

přípravu malty měla mít konzistenci takovou, aby po vyklopení z nádoby kaše držela tvar a měla minimální deformace. Kaše se smíchala s pískem a takto vzniklá směs se míchala na stejnorodou tuhou maltu. Další záměsová voda se většinou již nepřidávala. Množství vody v maltě bylo během přípravy minimalizováno.

Takto vytvořená malta se uložila k odležení do maltnice nebo na zajištěnou hromadu. Důležité bylo maltu chránit před vysycháním a tím před karbonatací, dále pak proti promrznutí. Z tohoto důvodu se hromady a maltnice převrstvovaly vrstvou jílového písku, drny, či jiným málo propustným materiálem. Odležení probíhalo libovolně dlouhou dobu.

Před použitím se pak malta zpracovala důkladným mícháním bez přídavku vody. Během tohoto procesu se zlepšila zpracovatelnost a teprve pak se přidávala voda a vyrobila se finální konzistence. [14]

5.2. Příprava malty ze suchého hydrátu

Pro přípravu vápenných malt se v historii používal též suchý vápenný hydrát. Suché hašení vápna na prach a použití takto připravovaného pojiva na zdění bylo popsáno již v 16. století. Pojivem těchto malt bylo vápno v podobě suchého vápenného hydrátu. Plnivem pak byl klasicky písek vhodné skladby a složení.

Příprava probíhala tak, že se suchý vápenný hydrát provrstvil se suchým pískem. Přehazováním se složky promíchaly ve stejnorodou směs a ta se kropila vodou tak, aby vznikla stejnoměrně probarvená malta. Množství záměsové vody se během přípravy minimalizovalo. Další postup přípravy tzn. uložení k odležení a následné míchání, byl stejný jako při přípravě malty z vápenné kaše. [14]

5.3. Příprava malty z nehašeného vápna

Dalším z tradičních postupů byla příprava malty z nehašeného vápna (malta z horkého vápna, horká malta). Tento způsob byl běžný a jednoduchý (použití hlavně ve středověku) a nejpravděpodobněji se používal k výrobě velkých objemů malty jak na zdění, tak i na omítky.

Uvážíme-li množství malty, která byla spotřebována při stavbách rozsáhlých hradů, je nepředstavitelná zásoba dobře odleželé vápenné kaše.

Z toho vyplývá, že ne všechny vápenné malty se v historii musely připravovat z odležené vápenné kaše. Pojivem tzv. horké malty bylo tedy nehašené vápno, které bylo vyhašeno až přímo v maltě. Kamenivem byl stejně jako v předchozích případech písek či štěrkopísek vhodného složení.

Nevyhašené, nahrubo nadrcené vápno se v určitém poměru provrstvilo suchým pískem. Další postup přípravy malty mohl být alternativní, a to ve dvou možných variantách.

V jedné variantě se připravovala tzv. horká malta, přičemž k hašení vápna docházelo až ve zdivu. Směs nehašeného vápna s pískem se navrstvila společně s kamením do bednění, které tvořily masivní zdi. Poté se do bednění nalila voda a tím došlo k hašení vápna. Malta tím byla vystavená vysoké teplotě a tlaku. V případě použití nedostatečného množství vody však nemuselo dojít k dohašení vápna.

Další varianta přípravy malty z horkého vápna probíhala tak, že se malta zalila vodou a hasila před použitím. Nechávala se odležet na hromadě. [14]

6. Zkoušení stavebních malt

6.1. Zkoušení čerstvých malt

Zkoušení jednotlivých malt se provádí dle platných norem:

- ČSN EN 1015-1 Stanovení zrnitosti (sítovým rozborem)
- ČSN EN 1015-3 Zkouška konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)
- ČSN EN 1015-4 Zkouška konzistence čerstvé malty pomocí přístroje pro hodnotu penetrace
- ČSN EN 1015-9 Stanovení doby zpracovatelnosti a času pro úpravu čerstvé malty
- ČSN EN 1015-6 Stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty
- ČSN EN 1015-7 Stanovení obsahu vzduchu v čerstvé maltě

6.2. Zkoušení zatvrdlých malt

Zkoušení zatvrdlých malt se řídí dle norem:

- ČSN EN 1015-10 Stanovení objemové hmotnosti zatvrdlé malty
- ČSN EN 1015-11 Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku
- ČSN EN 1015-12 Stanovení přídržnosti zatvrdlých malt
- ČSN 72 2452 Zkouška mrazuvzdornosti malty

II. Experimentální část

Cíl práce

V souvislosti s požadavky na materiály použitelné pro opravu a rekonstrukci historických objektů je potřebné věnovat se vývoji bezcementových malt na bázi historicky přípustných pojiv. Proto je cílem práce vyhledání možných pojiv, návrh složení a odzkoušení základních vlastností malt vhodných pro tento účel.

1. Metodika práce

Historizující malty a omítky jsou s přihlédnutím ke stále se zvyšujícímu podílu oprav a rekonstrukcí historických objektů ve stavebnictví sice specifickým, ale žádaným výrobním sortimentem. Jejich specifikum spočívá v tom, že nesmějí obsahovat žádné moderní součásti, kterými jsou především portlandský cement, vysokopecní struska či popílký jako zástupci pojiv, moderní modifikující přísady, event. průmyslově vyráběné kamenivo, jako např. agloporit, experlit či keramzit.

Proto při návrhu složení těchto malt je nutné vycházet z tradičních pojiv, tj. sádry, vzdušného vápna či hydraulického vápna a přírodního kameniva. Sádra se s ohledem na naprostý nedostatek nalezišť sádrovce na našem území dříve používala spíše jen ojediněle. Naše země jsou však bohaté na krasové oblasti, a proto tradičním a masově rozšířeným stavebním pojivem se stalo vápno. Jelikož v dřívějších dobách nebyly ještě plně vyvinuty postupy a prostředky pro podrobnou chemickou analýzu vstupních surovin, byl používán vápenec, který byl v dané lokalitě k dispozici bez velkého ohledu na jeho čistotu. Výpalem pak nejčastěji vzniklo vápno o určitém stupni hydraulicity, viz slavné Staropražské vápno neboli Pasta di Praga, vyznačující se přítomností většího či menšího podílu hydraulických oxidů, které dodávaly této maltovině poměrně dobrou vaznost.

Jelikož v současné době se v naší republice hydraulické vápno nevypaluje, je nanejvýš vhodné vytvořit pro účel vývoje historizujících malt alespoň hydraulické vápno směsné, tj. směs vzdušného vápna a pucolánu. Otázka použití vhodného pucolánu je poměrně náročná, neboť přírodní pucolány jako tras, tufy, tufity, křemelina se u nás buď vůbec nenacházejí, anebo se

v potřebné kvalitě netěží a nezpracovávají. Nejvhodnějším dostupným pucolánem je metakaolin, který se u nás vyrábí a je běžně dostupný v prodejní síti. Jeho kombinací se vzdušným vápnem anebo vápenným hydrátem lze pak vytvořit směsné hydraulické vápno, které může substituovat pojivo původních historických malt.

Jako plnivo pro historizující malty jsou nevhodnější přírodní kameniva, tj. písek kopaný nebo říční.

Na základě výše uvedeného byly pro vývoj historizující malty provedeny návrhy čtyř receptur. Vycházely ze tří surovin, a to vápenného hydrátu, metakaolinu a říčního písku, jejichž dávkování se navzájem lišilo takto:

- výchozí receptura sestávala z 86 % písku, 6 % metakaolinu a 8 % vápenného hydrátu.
- v dalších recepturách byl zachován konstantní obsah vápenného hydrátu a vždy po 2% se zvyšoval obsah metakaolinu na úkor písku.

Dle navržených receptur byly dále připraveny malty požadované konzistence, které byly odzkoušeny na základní technologické a rovněž i aplikační vlastnosti.

2. Postup práce

Použité suroviny byly ve vzduchosuchém stavu dákovány dle příslušných receptur v množství á 1,5 kg suché směsi.

Suché maltové směsi, dokonale zhomogenizované v laboratorní míchačce, byly podrobeny stanovení sypané objemové hmotnosti a dále bylo u nich určeno granulometrické složení síťovým rozborem, viz ČSN EN 1015-1.

Pro přípravu malt ze suchých směsí byl nejprve stanoven vodní součinitel, potřebný pro dosažení konstantní konzistence dle rozlití kužele na průměr koláče 170 ± 5 mm, viz ČSN EN 1015-3 .

V dalším byla ze suchých maltových směsí se záměsovou vodou odpovídající stanovenému vodnímu součiniteli připravena na laboratorní míchačce normovým způsobem čerstvá maltová směs. Tato byla jednak podrobena stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty a poté byla zaformována

do zkušebních trámců rozměrů 40x40x160 mm. Formy se vzorky malt byly ponechány volně v laboratorním prostředí po dobu pěti dnů. Poté byla zkušební tělesa odformována a exponována v laboratorním prostředí při konstantní teplotě 20°C. Souběžně s přípravou zkušebních malt byl všem postupům a zkouškám podroben i referenční vzorek komerčně vyráběné suché maltové směsi s obchodním názvem Schwenk TM 5, která je deklarována jako malta určená zejména pro rekonstrukce historického zdiva.

Po sedmi a dále 28 dnech hydratace byly vzorky odebírány ke stanovení pevnosti v tahu za ohybu, pevnosti v tlaku a objemové hmotnosti.

3. Použité suroviny a přístroje

3.1. Použité suroviny

Při experimentální části byla jako referenční vzorek použita průmyslově vyráběná trasvápenná maltová směs SCHWENK TM 5. Technické údaje:

- zdicí malta skupiny M 5 dle ČSN EN 992-2
- pojivo: vápno, bavorský suevitský tras, malý podíl cementu
- plnivo: drcený tříděný vápenec (zrno max 2 mm)

Pro výrobu historizující malty bylo použito tří základních surovin a to vápenného hydrátu, metakaolinu a písku.

Vápenný hydrát PROFI Jurat Kalk je bílý vápenný hydrát určený jako pojivová složka pro přípravu zdicích nebo omítkových malt přímo na stavbě. Technické údaje:

- Sypná hmotnost: cca 425 kg·m⁻³

Tabulka 4 - Chemické složení vápenného hydrátu PROFI Jurat Kalk

Chemické složení [%]			
CaO + MgO	MgO	CO ₂	SO ₃
≤ 90	≤ 5	≤ 4	≤ 2

Metakaolin Mefisto K05 firmy České lupkové závody a.s. je získáván řízenými procesy tepelné a granulometrické úpravy jílovců a plavených kaolinů stabilního chemického složení. Jedná o vysoce aktivní pucolán.

Tabulka 5 - Chemické složení metakaolinu Mefisto K05

Chemické složení [%]						
Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	CaO
38,50	58,70	0,85	0,72	0,50	0,38	0,20

Jako plnivo byl použit tříděný písek z pískovny Bratčice, který byl dovezen ve frakci 0 – 4 mm. Jelikož pro přípravu malt byla navržena frakce 0 – 2 mm, byl písek pro dosažení požadované zrnitosti zbaven frakce 2 -4 mm na normovém síti o velikosti ok 2 mm. Písek byl navíc dovezen s poměrně vysokou vlhkostí, a byl proto před použitím v laboratorní sušárně vysušen do konstantní hmotnosti.

3.2. Použité přístroje

K experimentální části bylo využito přístrojů, kterými jsou vybaveny laboratoře ÚTHD VUT Brno, kde se uskutečnily všechny části experimentu. Jednalo se o tato zařízení:

- Laboratorní míchačka – dle normy ČSN EN 196-1
- Laboratorní váhy – Radwag PS 4500/C/2, přesnost 0,1 g, průmyslová váha s krytím IP65 – přesnost 10 g
- Střásací stolek – pro stanovení konzistence čerstvé malty dle normy ČSN EN 1015-3
- Posuvné digitální měřítka – Digital Caliper 200 mm
- Přístroj pro stanovení sypané hmotnosti – odpovídá požadavkům ČSN EN 459-2
- Formy na zkušební tělesa – trojformy na výrobu trámečků 100x40x40 mm odpovídající ČSN EN 196-1
- Zkušební stroj pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku – dle ČSN EN 196-1

- Přípravek do zkušebního přístroje pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu a přípravek pro stanovení pevnosti v tlaku – dle ČSN EN 196-1
- Sada normových sít pro stanovení zrnitosti – dle ČSN EN 1015-1
- Laboratorní sušárna Binder FD 53

4. Vyhodnocení zkoušek

4.1. Návrh receptur suchých maltových směsí

Jak uvedeno výše, návrh receptur byl veden tak, že od základní receptury se odvíjely další tři, přičemž byl postupně zvyšován obsah metakaolinu na úkor písku při zachování konstantního obsahu vápenného hydrátu. Smyslem tohoto návrhu bylo zachovat dobrou plasticitu malty, danou dostatečným obsahem vápenného hydrátu, a prověřit možné zlepšení hydraulické schopnosti směsného pojiva postupným zvyšování poměru pucolánu k vápennému hydrátu. Rozpis jednotlivých receptur uvádí tab. 6.

Tabulka 6 - Navržené receptury historizujících zdicích malt

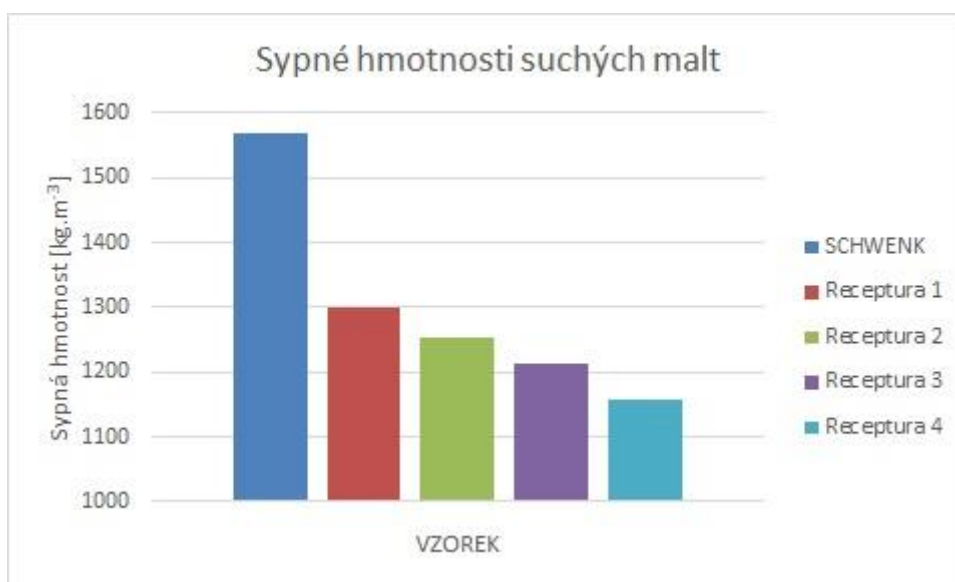
Surovina	Obsah dané suroviny [%]			
	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek 4
DTK Bratčice 0-2 mm	86	84	82	80
Metakaolin Mefisto	6	8	10	12
Vápený hydrát	8	8	8	8

4.2. Sypná hmotnost a granulometrický rozbor suché maltové směsi

Sypná hmotnost jednotlivých vzorků suché maltové směsi je uvedena v tab. 7 a v grafu 1.

Tabulka 7 - Sypné hmotnosti suchých maltových směsí

Označení vzorku	Sypná hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
Vzorek referenční	1570
Vzorek 1	1300
Vzorek 2	1253
Vzorek 3	1213
Vzorek 4	1157



Graf 1 - Sypné hmotnosti suchých maltových směsí

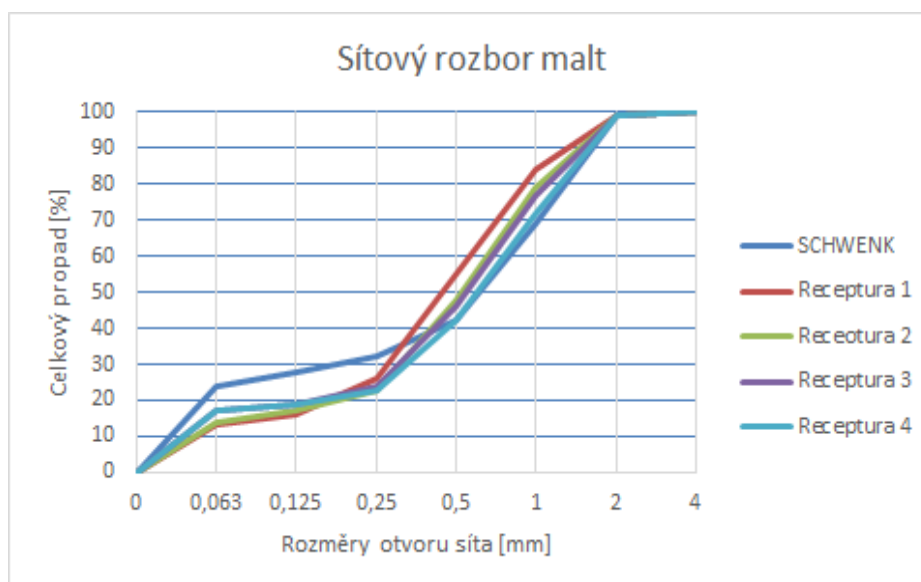
Z výsledků uvedených v tabulce je zřejmé:

- se zvyšujícím se obsahem metakaolinu se snižuje sypná hmotnost suché maltové směsi. Popsaná závislost je dána velice nízkou objemovou hmotností metakaolinu
- nejvyšší hodnotu sypné hmotnosti vykazuje referenční vzorek. Z uvedeného lze soudit, že tento vzorek obsahuje málo lehkých součástí, a to nejspíše vápenného hydrátu.

Granulometrii vzorků suché maltové směsi, stanovenou pomocí síťového rozboru, představuje tabulka 8 a zrnitostní křivka v grafu 2.

Tabulka 8 - Granulometrie vzorků suchých maltových směsí

Velikostní interval síta [mm]	Zbytek na síti [%]				
	Vzorek ref.	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek 4
4	0	0	0	0	0
2	1	1	1	1	1
1	29	15	20	22	26
0,5	28	30	31	32	30
0,25	10	29	25	22	19
0,125	4	9	6	6	5
0,063	4	3	3	2	2
0	24	13	14	15	17
Celkem	100	100	100	100	100



Graf 2 - Zrnitostní křivky vzorků suchých maltových směsí

Z grafické závislosti i výsledků síťového rozboru plyne:

- se zvyšujícím se obsahem metakaolinu klesá podíl hrubozrnných částic a naopak vzrůstá podíl částic jemnozrnných. Z uvedeného lze soudit, že se zvyšujícím se obsahem metakaolinu ve vzorku se bude zvyšovat i množství záměsové vody, potřebné pro přípravu kaše zvolené konstantní konzistence
- referenční vzorek vykázal podstatně vyšší podíl jemnozrnných částic než všechny ostatní vzorky. Jeho vodní součinitel by proto měl vykazovat nejvyšší hodnotu ze všech sledovaných vzorků.

4.3. Množství záměsové vody

Množství záměsové vody, potřebné pro dosažení konstantní konzistence všech zkoušených vzorků, bylo vyjádřeno pomocí vodního součinitele $w = v / s.m.$, kde:

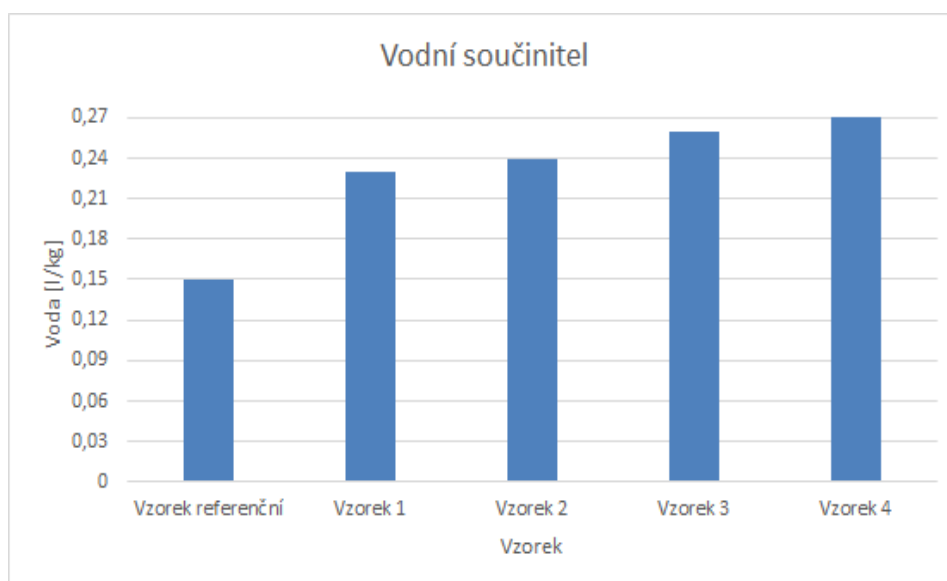
v množství vody v kg

$s.m.$ množství suché maltové směsi v kg.

Výsledky stanovení jsou uvedeny v tab. 9 a formou grafické závislosti v grafu 3.

Tabulka 9 - Množství záměsové vody na maltu konstantní konzistence

Označení vzorku	Rozlití koláče [mm]	Vodní součinitel [%]
Vzorek referenční	170 x 174	0,15
Vzorek 1	174 x 171	0,23
Vzorek 2	172 x 172	0,24
Vzorek 3	174 x 170	0,26
Vzorek 4	170 x 169	0,27



Graf 3 - Množství záměsové vody na maltu konstantní konzistence

Z dosažených výsledků lze učinit závěr:

- v souladu s výše uvedeným předpokladem rostla u vzorků navržené malty hodnota vodního součinitele úměrně zvyšujícímu se podílu jemnozrnný částic

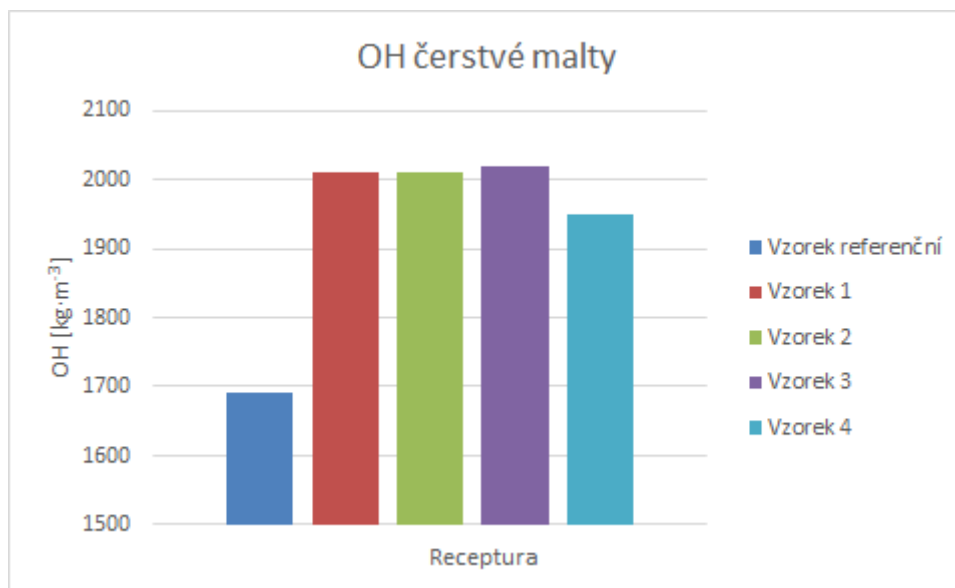
- naopak v případě referenční malty s nejvyšším podílem jemnozrnných částic vykázal vodní součinitel oproti předpokladu vůbec nejnižší hodnotu vodního součinitele z celého zkoušeného souboru. Lze učinit závěr, že referenční vzorek zdicí malty byl modifikován ztekucovací přísadou.

4.4. Objemová hmotnost čerstvé malty

Výsledky stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty jsou uvedeny v tab. 10 a v grafické podobě v grafu 4.

Tabulka 10 - Objemová hmotnost čerstvé malty

Označení vzorku	Objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
Vzorek referenční	1690
Vzorek 1	2010
Vzorek 2	2010
Vzorek 3	2020
Vzorek 4	1950



Graf 4 - Objemová hmotnost čerstvé maltové směsi

Na základě dosažených výsledků lze říci:

- objemové hmotnosti zkoušených vzorků čerstvých malt jsou téměř shodné, pouze u posledního vzorku 4 s nejvyšším vodním součinitelem hodnota sledované objemové hmotnosti poklesla

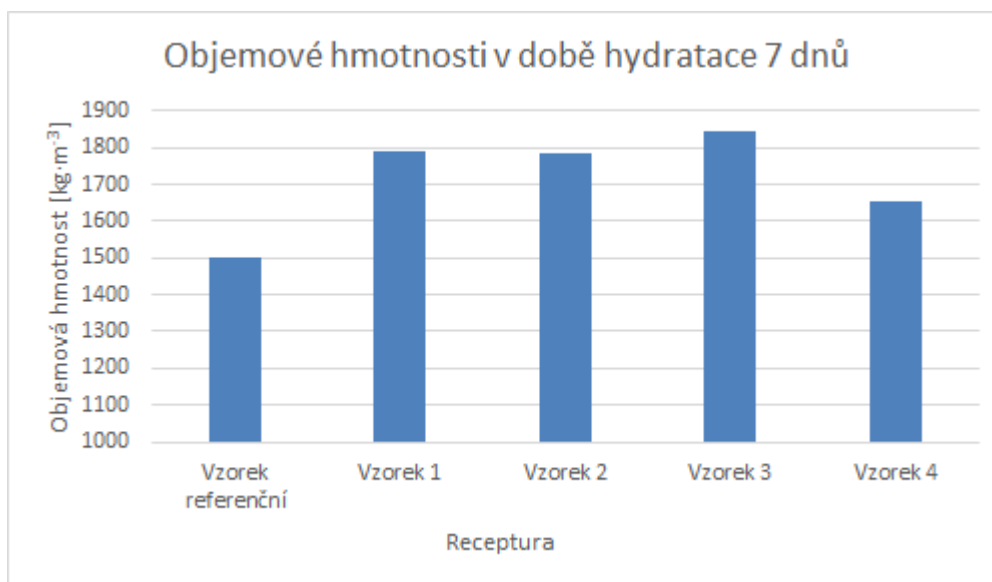
- u vzorku referenčního byla oproti předpokladu, že nejnižší vodní součinitel signalizuje nejvyšší objemovou hmotnost, stanovena výrazně nižší hodnota objemové hmotnosti než u všech zbylých vzorků. Z uvedeného vyplývá, referenční vzorek suché maltové směsi je modifikován provzdušňovací přísadou.

4.5. Objemová hmotnost a pevnosti zatvrdlé malty

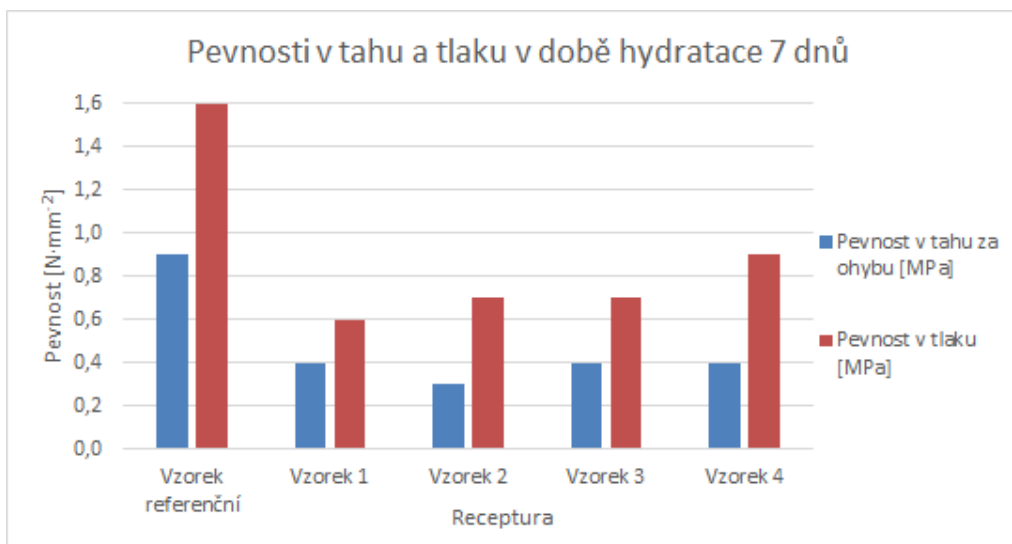
Výsledky stanovení základních technologických vlastností zatvrdlé malty v době hydratace 7 dnů jsou dokumentovány v tabulce 11 a graficky v grafech 5 a 6, v době hydratace 28 dnů pak v tabulce 12 a grafech 7 a 8.

Tabulka 11 - Technologické vlastnosti zatvrdlých malt v době hydratace 7 dnů

Označení vzorku	Objemová	Pevnost v tahu za	Pevnost v tlaku
	hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	ohybu [MPa]	[MPa]
Vzorek referenční	1500	0,9	1,6
Vzorek 1	1790	0,4	0,6
Vzorek 2	1790	0,3	0,7
Vzorek 3	1840	0,4	0,7
Vzorek 4	1650	0,4	0,9



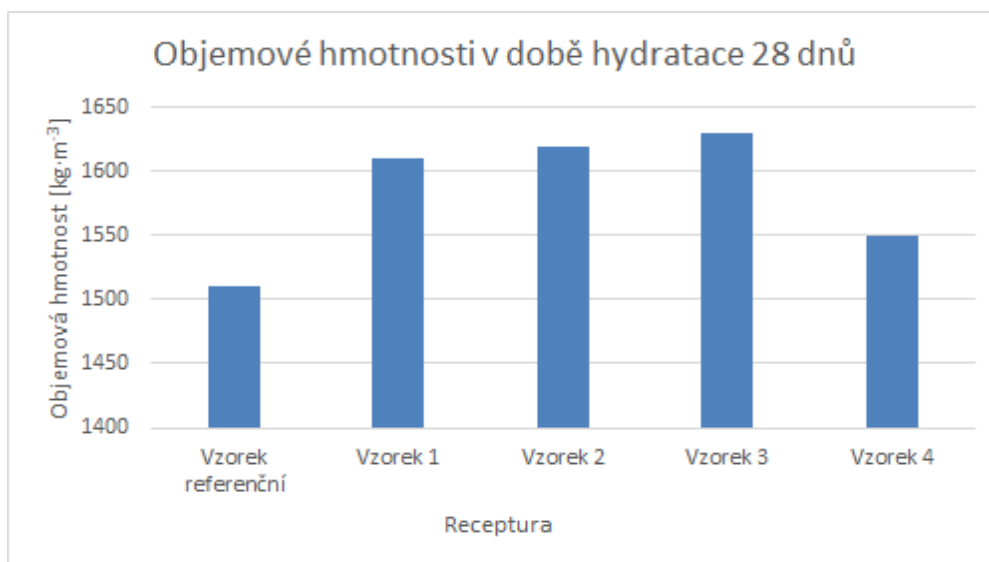
Graf 5 – Objemové hmotnosti zatvrdlých malt v době hydratace 7 dnů



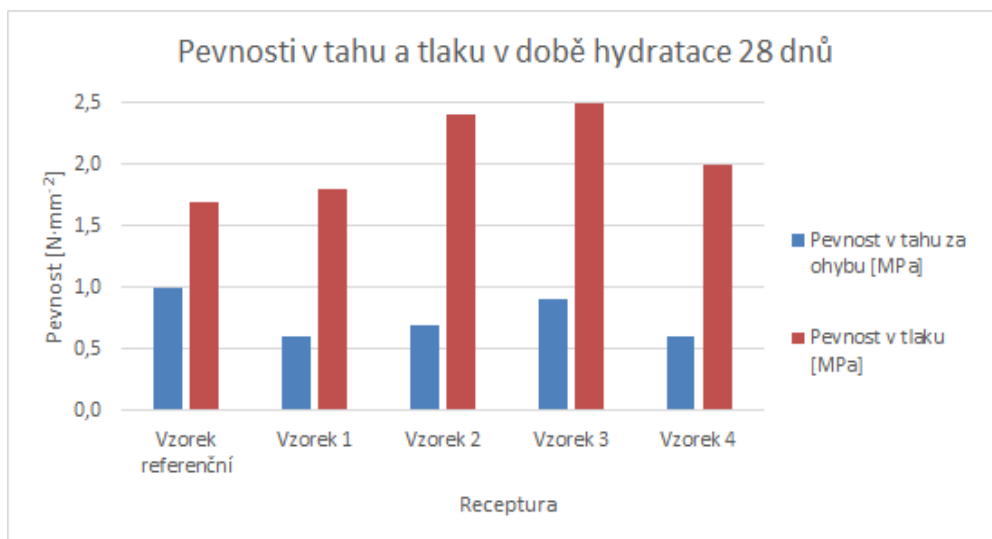
Graf 6 - Pevnosti zatvrdlých malt v době hydratace 7 dnů

Tabulka 12 - Technologické vlastnosti zatvrdlých malt v době hydratace 28 dnů

Označení vzorku	Objemová	Pevnost v tahu za	Pevnost v tlaku
	hmotnost [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	ohybu [MPa]	[MPa]
Vzorek referenční	1510	1,0	1,7
Vzorek 1	1610	0,6	1,8
Vzorek 2	1620	0,7	2,4
Vzorek 3	1630	0,9	2,5
Vzorek 4	1550	0,6	2,0



Graf 7 – Objemové hmotnosti zatvrdlých malt v době hydratace 28 dnů



Graf 8 - Pevnosti zatvrdlých malt v době hydratace 28 dnů

Na základě dosažených výsledků lze konstatovat:

- objemové hmotnosti zatvrdlých malt korespondovaly s objemovými hmotnostmi čerstvých malt, byly však vlivem vysychání s dobou hydratace vždy nižší. Za zmínku stojí zjištění, že objemová hmotnost zkoušených vzorků zatvrdlé malty poklesla mezi 7. a 28. dnem poměrně výrazně. Avšak u vzorku referenčního během tohoto období poklesla jen velmi málo. Kromě vlivu nejnižšího vodního součinitele svědčí tento projev i o provzdušnění vzorku, které se vyznačuje tím, že vzdušné póry přetínají póry kapilární, a zpomalují tak proces vysychání
- pevnosti referenčního vzorku v době hydratace 7 dnů byly nejvyšší z celého zkoušeného souboru. Důvodem je výrobcem deklarovaná přítomnost cementu v suché směsi, neboť právě cement se vyznačuje oproti hydraulickým vápnům podstatně vyšší hydratační rychlostí, a tedy i vyššími počátečními pevnostmi. Vzhledem k marginálnímu příspěvku trasu a vápna na růst pevností a současně vzhledem k reálně předpokládanému vlivu provzdušnění, projevujícímu se silně pórovitou strukturou zatvrdlé malty, pevnosti referenčního vzorku s dobou hydratace rostly již jen zcela zanedbatelně. Opačně u vzorků navržených malt s hydraulickým vápnem na bázi metakaolinu hydratační rychlost postupně narůstala, takže v době hydratace 28 dnů

vykázaly všechny zkoušené vzorky vyšší tlakovou pevnost než vzorek referenční.

4.6. Aplikační vlastnosti

Jako poslední část experimentu bylo provedeno natažení vzorků malt na polystyrenový podklad o rozměru 200 x 120 mm. Při tom se posoudila zpracovatelnost čerstvých malt a odolnost malty proti smršťování. Výsledný zatvrdlý povrch malt je patrný na obr. 7.



Obrázek 7- Výsledný zatvrdlý povrch malt při zkoušce aplikačních vlastností

Na základě dosažených výsledků lze konstatovat:

- zpracovatelnost pomocí hlazení byla dobrá u všech zkoušených vzorků, malty vytvářely souvislý hladký povrch
- odolnost malt proti smršťování a tvorbě trhlin byla u všech vzorků dobrá, žádný nevykazoval po zatvrdnutí náchylnost ke vzniku trhlin.

5. Diskuze výsledků

Na základě dosažených výsledků lze konstatovat:

- ve srovnání s referenčním vzorkem trasvápenné zdicí malty, určené pro rekonstrukci historických budov, v práci navržené historizující zdicí maltové směsi vykázaly srovnatelné, případně i lepší technologické vlastnosti
- provedenými zkouškami se dospělo k závěru, že referenční směs je modifikována ztekucovací a provzdušňovací přísadou, navíc obsahuje portlandský cement

- i když ztekucovací přísada výrazně snížila oproti zkoušeným maltám potřebné množství záměsové vody a cement dodal soustavě dobré počáteční pevnosti, provzdušnění malty a zřejmě i horší pucolánové schopnosti trasu způsobily, že v době hydratace 28 dnů byla normou sledovaná tlaková pevnost tohoto vzorku vůbec nejnižší z celého zkoušeného souboru. Navíc vykazala pouze hodnotu 2,5 MPa oproti hodnotě 5 MPa, deklarované výrobcem
- z navržených vzorků historizující zdicí malty se nejlépe osvědčil vzorek 3. U vzorku 4 s nejvyšším obsahem metakaolinu byly pevnosti ve srovnání s předešlým buď stejné, nebo dokonce nižší. Důvod lze spatřovat v tom, že při zvoleném dávkování vápenného hydrátu a metakaolinu nebyl v soustavě již dostatek vápenatých iontů na tvorbu afwillitu $C_3S_2H_3$, který představuje průměrné složení vazných kalciumhydrosilikátů. Zatímco u afwillitu je stechiometrický poměr CaO/SiO_2 roven hodnotě 1,4, u vzorku 4 odpovídal pouze poměru 1,23. Nadbytečná část metakaolinu pak působila pouze jako inertní filler, který vyžadoval zvýšený podíl záměsové vody s negativním dopadem na pevnosti. Oproti tomu vzorek 3 vykázal stechiometrický poměr CaO/SiO_2 ve výši 1,48, a tedy ideální poměr pro tvorbu kalciumhydrosilikátových fází
- navržené složení vzorku 3 se tak ukázalo jako vhodné pro přípravu či výrobu historizující zdicí malty s tím, že jej lze začlenit do pevnostní třídy M 2,5.

Závěr

Bakalářská práce se zabývala vývojem a vlastnostmi historizující zdicí malty. Cílem bylo najít vhodný pojivový systém pro tuto maltu, který bude založen na použití vápenného hydrátu modifikovaného trasem, případně jiným pucolánem.

Vzhledem k tomu, že samostatný tras či trasová moučka pro modifikaci vápenného hydrátu nejsou v ČR dostupné, musel být vápenný hydrát modifikován u nás v obchodní síti běžně se vyskytujícím metakaolinem. Jako referenční vzorek byla zvolena suchá maltová směs firmy SCHWENK, která se používá při opravách historických objektů a je modifikována právě suevitským trasem.

Na základě navržených receptur s různým množstvím metakaolinu a konstantním množstvím vápenného hydrátu byly namíchány maltové směsi, u kterých byly odzkoušeny vlastnosti jak technologické, tak aplikační a ty byly porovnány s vlastnostmi referenčního vzorku.

Zásadním zjištěním bylo, že v experimentální části navržené receptury historizující zdicí malty vykazovaly srovnatelné, případně i lepší technologické vlastnosti v porovnání s komerční maltovou směsí SCHWENK TM 5.

Pevnosti v době hydratace 28 dní byly u vzorků s metakaolinem vyšší a to i přes to, že u referenční malty byl výrazně nižší vodní součinitel. Nižší pevnosti referenční malty tak můžeme přisoudit použití provzdušňovací přísady a pravděpodobně i horší pucolánové schopnosti trasu.

Lze konstatovat, že cíl experimentální části byl splněn vzhledem k tomu, že vzorek malty č. 3 lze zařadit do pevnostní třídy M 2,5 a je tedy vhodný pro přípravu či výrobu historizující zdicí malty.

Seznamy

Seznam použitých zdrojů

- [1] KOTLÍK, Petr. *Stavební materiály historických objektů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1999. ISBN 8070803479.
- [2] ROVNANÍKOVÁ, Pavla. *Stavební pojiva: Constructive binder : historie - současnost - perspektivy vývoje : teze přednášky ke jmenování profesorem v oboru fyzikální a stavebně materiálové inženýrství*. Brno: VUTUM, 2004. ISBN 8021425423.
- [3] LOSOS, Ludvík a Miloš GAVENDA. *Štukatéřství*. Praha: Grada, 2010. Řemesla, tradice, technika. ISBN 9788024721750.
- [4] Lea's chemistry of cement and concrete. 4th ed. Editor Peter C Hewlett. Oxford: Elsevier, 2004, 1057 s. ISBN 07-506-6256-5.
- [5] HOŠEK, Jiří. *Rekonstrukce staveb - materiály*. Praha: České vysoké učení technické, 1994
- [6] NOVÁK, Jaroslav. *Nauka o materiálech 10: stavební materiály I*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. ISBN 8001016196.
- [7] ADÁMEK, Jiří. *Stavební látky*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2006.
- [8] ROVNANÍKOVÁ, Pavla. Vlastnosti betonů modifikovaných minerálními příměsmi [online]. In: . s. 41 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: http://uchp.icpf.cas.cz/ehlt/oscht/KS2011_Rovnanikova.pdf
- [9] MATOUŠKOVÁ, Anna. Od tradičního vápenictví na území Českého krasu ke vzniku moderní továrny na výrobu portlandského cementu v Králově Dvoře v roce 1911. Králův Dvůr: Královodvorská cementárna, 1995.
- [10] LÁNÍK, Jaroslav a Miloš CIKRT. Dvě tisíciletí vápenictví a cementárenství v českých zemích. S.l.: Svaz výrobců cementu a vápna Čech, Moravy a Slezska, 2001.
- [11] ROVNANÍKOVÁ, Pavla. Omítky: chemické a technologické vlastnosti. Praha: Společnost pro technologie ochrany památek - Stop, 2002. ISBN 80-86657-00-0.

- [12] SCHULZE, Walter. *Necementové malty a betony*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 80-03-00188-9.
- [13] ROVNANÍKOVÁ, Pavla. *Omítky historických staveb: Složení, analýzy, obnova* [online]. 2016. Dostupné také z: <http://uchp.icpf.cas.cz/ehlt/oscht/Rovnanikova%20Kalsem%202016.pdf>
- [14] MICHOLINOVÁ, Dagmar. *Příprava vápenných malt v péči o stavební památky*. 2. vyd. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2014. ISBN 9788087438572
- [15] HOŠEK, Jiří a Ludvík LOSOS. *Historické omítky: průzkumy, sanace, typologie*. Praha: Grada, 2007. Stavitel. ISBN 9788024713953.
- [16] XU, Hua a Jannie S.J. VAN DEVENTER. Geopolymerisation of multiple minerals. *Minerals Engineering* [online]. 2002, 15(12), 1131-1139 [cit. 2017-05-24]. DOI: 10.1016/S0892-6875(02)00255-8. ISSN 08926875. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0892687502002558>
- [17] BODNÁROVÁ, Lenka. *Kompozitní materiály*. Brno: VUT Brno, 2007. Studijní opory.
- [18] LIME METAKAOLIN MORTARS – PROPERTIES AND APPLICATIONS dostupné z: <http://conservarcal.lnec.pt/pdfs/UIW06.pdf>
- [19] ČESKÉ LUPKOVÉ ZÁVODY, A.S. ČLUZ a.s. : *žáruvzdorná ostřiva - lupek a kaolín* [online]. 2016 [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: <http://www.cluz.cz/>
- [20] VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ.: *Zkoušení stavebních hmot a výrobků - malty* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=malty>
- [21] FRIDRICHOVÁ, Marcela, Karel DVOŘÁK, Dominik GAZDIČ a Iveta HÁJKOVÁ. *BJ16 - Maltoviny: modul M02*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2014. Studijní opory pro studijní programy s prezenční formou studia. ISBN 978-80-214-4973-2.
- [22] JIRÁSEK, Jakub, Martin SIVEK a Petr LÁZNIČKA. *Ložiska nerostů*. Ostrava: Anagram, c2010. ISBN 978-80-7342-206-6.
- [23] ČSN EN 459-1 ed. 2 (722201) *Stavební vápno – část 1: Definice, specifikace a kritéria shody*. Platnost od 1. 4. 2011.

- [24] ČSN EN 459-2 (722201) Stavební vápno – Část 2: Zkušební metody. Platnost od 1. 4.2011.
- [25] ČSN EN 197-1 ed.2 (722101) – Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití
- [26] RODRIGUEZ-NAVARRO, C., HANSEN, E., GINELL, W. S. Calcium Hydroxide Crystal Evolution upon Aging of Lime Putty. J. of the American Ceramic Society.1998,vol. 81, no. 11, p. 3032-3400.
- [27] MICHOLINOVÁ, D. Vliv přírodních vláknitých přísad na chování a vlastnosti vápenných malt. [online]. Brno: FAST VUT v Brně, 2003 [cit. 11. 05. 2017]. Dostupný z: <http://www.fce.vutbr.cz/veda/dk2003texty/pdf/4-2/rp/micholnova.pdf>
- [28] NEČAS, Radovan, Martin BOHÁČ a Vladimír PERSAŇ. Vliv historických přísad na vlastnosti vápenných kaší a malt. TZB Info [online]. 2013 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/10511-vliv-historickych-prisad-na-vlastnosti-vapennych-kasi-a-malt>
- [29] KUČKOVÁ, Štěpánka, Michaela CRHOVÁ, Iva KŘÍŽOVÁ, Lucie VAŇKOVÁ, Peter KONÍK, Radovan HYNEK a Milan KODÍČEK. Organické příměsi přidávané do historických malt. IMateriály [online]. 2009 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: http://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/materialy/organicke-primesi-pridavane-do-historickych-malt_101474.html
- [30] REJNUŠ, Jiří. SUEVITSKÝ TRAS - jeho vznik, vlastnosti a užití. In: [Http://www.prismaconsult.cz](http://www.prismaconsult.cz) [online]. [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.prismaconsult.cz/suevitsky-tras-1>

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Přísady do malty v jednotlivých historických obdobích [15]	31
Tabulka 2 - Přísady do malt používané v minulosti a v současnosti [15].....	32
Tabulka 3 - Chemické složení trasů (vyjádřeno obsahem oxidů) [30]	36
Tabulka 4 - Chemické složení vápenného hydrátu PROFI Jurat Kalk	43
Tabulka 5 - Chemické složení metakaolinu Mefisto K05	44
Tabulka 6 - Navržené receptury historizujících zdicích malt	45
Tabulka 7 - Sypné hmotnosti suchých maltových směsí	46
Tabulka 8 - Granulometrie vzorků suchých maltových směsí.....	47
Tabulka 9 - Množství záměsové vody na maltu konstantní konzistence	48
Tabulka 10 - Objemová hmotnost čerstvé malty	49
Tabulka 11 - Technologické vlastnosti zatvrdlých malt v době hydratace 7 dnů	50
Tabulka 12 - Technologické vlastnosti zatvrdlých malt v době hydratace 28 dnů	51

Seznam grafů

Graf 1 - Sypné hmotnosti suchých maltových směsí	46
Graf 2 - Zrnitostní křivky vzorků suchých maltových směsí	47
Graf 3 - Množství záměsové vody na maltu konstantní konzistence	48
Graf 4 - Objemová hmotnost čerstvé maltové směsi	49
Graf 5 – Objemové hmotnosti zatvrdlých malt v době hydratace 7 dnů	50
Graf 6 - Pevnosti zatvrdlých malt v době hydratace 7 dnů.....	51
Graf 7 – Objemové hmotnosti zatvrdlých malt v době hydratace 28 dnů.....	51
Graf 8 - Pevnosti zatvrdlých malt v době hydratace 28 dnů.....	52

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Přírodní sádrovec Kateřinky u Opavy [22]	18
Obrázek 2 - Schéma změny klencové krystalové mřížky při výpalu [12]	25
Obrázek 3 - Mikrostruktura hašeného vápna [26].....	35
Obrázek 4 - Vápenný cyklus [11].....	35
Obrázek 5 - Mikrostruktura kaolinitu a metakaolinitu [8]	35
Obrázek 6 - Porovnání pórovitosti trasů [30]	35
Obrázek 7 - Výsledný zatvrdlý povrch malt při zkoušce aplikačních vlastností	35